

**TOZ METALURJİSİ YÖNTEMİYLE ÜRETİLMİŞ Al-Si/SiC_p
KOMPOZİTLERİN MEKANİK VE İŞLENEBİLİRLİK ÖZELLİKLERİNİN
ARAŞTIRILMASI**

MUSTAFA GÜNAY

**DOKTORA TEZİ
MAKİNA EĞİTİMİ BÖLÜMÜ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

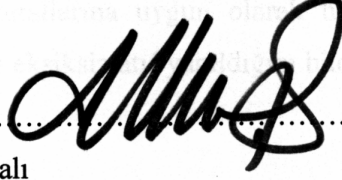
HAZİRAN 2009

ANKARA

Mustafa GÜNAY tarafından hazırlanan TOZ METALURJİSİ YÖNTEMİYLE ÜRETİLMİŞ Al-Si/SiC_p KOMPOZİTLERİN MEKANİK VE İŞLENEBİLİRLİK ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI adlı bu tezin Doktora tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Ulvi ŞEKER

Tez Danışmanı, Makine Eğitimi Anabilim Dalı



Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Makine Eğitimi Anabilim Dalında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

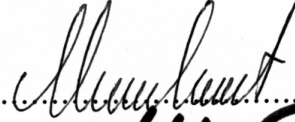
Prof. Dr. Muammer NALBANT

Makina Eğitimi, Gazi Üniversitesi



Prof. Dr. Mahmut GÜLESİN

Makina Eğitimi, Gazi Üniversitesi



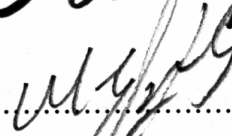
Prof. Dr. Ulvi ŞEKER

Makina Eğitimi, Gazi Üniversitesi



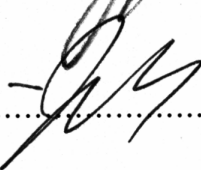
Prof. Dr. Mahmut İZCİLER

Endüstriyel Teknoloji Eğitimi, Gazi Üniversitesi



Doç. Dr. İbrahim ÇİFTÇİ

Makina Eğitimi, Karabük Üniversitesi



Tarih: 25/06/2009

Bu tez ile G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Doktora derecesini onamıştır.

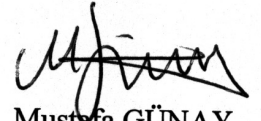
Prof. Dr. Nail ÜNSAL

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü



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.



Mustafa GÜNAY

**TOZ METALURJİSİ YÖNTEMİYLE ÜRETİLMİŞ Al-Si/SiC_p
KOMPOZİTLERİN MEKANİK VE İŞLENEBİLİRLİK ÖZELLİKLERİNİN
ARAŞTIRILMASI
(Doktora tezi)**

Mustafa GÜNAY

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Haziran 2009**

ÖZET

Bu araştırmada, Toz Metalurjisi yöntemiyle metal matrisli kompozit malzemeler üretilmiştir. Kompozitlerin üretiminde matris malzemesi olarak ortalama 63µm ebatlarında ön alaşımlı Alumix 231 (Al-Si alaşımı) tozu, takviye elemanı olarak ise ortalama 20,1 µm ebatlarında SiC parçacıklar kullanılmıştır. Ağırlıkça %5, %10, %15 SiC takviyeli kompozit numune ve Alumix 231 kodlu dört farklı numune üretilmiştir. Üretilen MMK malzemelerin mikroyapı ve bazı mekanik özellikleri (sertlik, yoğunluk ve çapraz kırılma dayanımları) incelenmiştir. Mikroyapı incelemeleri parçacık dağılımının tüm numunelerde homojen olduğunu ancak kompozit numunelerde gözenekliliğin oluştuğunu göstermiştir. En yüksek sertlik değeri %15 SiC kodlu numunede 104 VH5 olarak elde edilmiştir. En yüksek çapraz kırılma dayanımı (ÇKM) matris alaşımından üretilen numunede ölçülürken, en düşük ÇKM %15 SiC kodlu numunede ölçülmüştür.

Numuneler, kaplamasız sementit karbür, kübik bor nitrür ve çok kristalli elmas kesici takımlar kullanılarak tornalama metoduyla işlenebilirlik deneylerine tabi tutulmuştur. Deneyler, kuru kesme şartlarında bilgisayar sayısal denetimli (BSD) torna tezgahında dört farklı kesme hızı, iki farklı ilerleme ve sabit kesme derinliğinde yapılmıştır. Numunelerin işlenebilirliği talaş oluşumu, kesme

kuvvetleri ve yüzey pürüzlülüğü açısından araştırılmıştır. Özellikle SK kesicide yüksek kesme hızlarında takımın burun bölgesinde aşınmanın olduğu ve buna bağlı olarak talaş yığılması artmıştır. SiC ağırlık oranının artmasıyla beraber artan sertliğe bağlı olarak kesme kuvvetlerinin arttığı tespit edilmiştir. Yüzey pürüzlülüğü açısından en kötü işlenebilirliğe sahip numune %5 SiC kodlu numune olarak belirlenmiştir. Kesici takımların performansı yüzey kalitesi açısından değerlendirilmiş olup en iyiden en kötüye doğru ÇKE, KBN ve SK şeklinde gerçekleşmiştir. En iyi yüzey pürüzlülüğü, %15 SiC kodlu numunenin 0,1 mm/rev ilerleme ve 300 m/min kesme hızında PCD kesici takımla işlenmesiyle 0,45 µm olarak elde edilmiştir.

Bilim Kodu : 708.3.028
Anahtar Kelimeler : Metal matrisli kompozit, toz metalurjisi yöntemi, işlenebilirlik, kesme kuvvetleri, yüzey pürüzlülüğü
Sayfa Adedi : 209
Tez Yöneticisi : Prof. Dr. Ulvi ŞEKER

**INVESTIGATIONS OF THE MACHINABILITY AND MECHANICAL
PROPERTIES OF AL-Si/SiC_p COMPOSITES PRODUCED BY POWDER
METALLURGY METHOD
(Ph.D. Thesis)**

Mustafa GÜNEY

**GAZİ UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY
June 2009**

ABSTRACT

In this study, particulate reinforced metal matrix composites (MMC_s) were produced by Powder Metallurgy method. Prealloyed Alumix 231 (Al-Si alloy) powder of 63 µm in average size was used as matrix material and SiC particles of 20,1 µm in mean particle size were used as reinforcement material for production of MMC_s. Four different specimens containing 0, 5, 10 and 15% weight ratios SiC were produced. Microstructure and some of the mechanical properties (hardness, density and transverse rupture strength) of these specimens were investigated. Microstructural observations showed that the distribution of particles in all of the specimens was relatively homogenous, but porosity occurred in the composite specimens. The highest hardness value was measured as 104 VH5 for the specimen containing 15SiC wt.%. While the highest transverse rupture strength (TRS) was measured on the specimen produced from matrix alloy, the lowest TRS value was obtained on the 15SiC wt.% specimen.

The specimens were subjected to machinability tests through turning operation using uncoated cemented carbide, cubic boron nitride and polycrystalline diamond cutting tools. The tests were carried out under dry condition on a computer numerical control (CNC) lathe by using four different cutting speeds,

two different feed rates and fixed depth of cut. Machinability of the specimens was investigated in respect of chip formation, tool wear, cutting forces and surface roughness. Especially, tool wear at the nose of WC cutting tool was determined in the high cutting speeds and BUE increased depending on this formation. The cutting forces increased depending on the increased hardness because of weight ratio of SiC. The worst machinability was obtained in the specimen of code 5SiCwt.% in respect of surface roughness. Considering the performance of the cutting tools in terms of surface roughness, to the worst from the best, PCD, CBN and WC were determined. The best surface roughness was obtained by using PCD cutting tool at 0,1 mm/rev and 300 m/min cutting speed with the 15SiC wt.% specimen as μm 0,45.

Science Code	: 708.3.028
Key Words	: Metal matrix composite, powder metallurgy method, machinability, cutting forces, surface roughness
Page Number	: 209
Adviser	: Prof. Dr. Ulvi ŞEKER

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım süresince engin bilgi birikimi ve değerli katkıları ile beni yönlendiren saygıdeğer hocam ve danışmanım Sayın Prof. Dr. Ulvi ŞEKER'e, saygı ve şükranlarımı sunarım.

Değerli bilgilerinden faydalandığım Sayın Prof. Dr. Mehmet TÜRKER'e, Sayın Doç. Dr. Yusuf ÖZÇATALBAŞ'a, Sayın Doç. Dr. İbrahim ÇİFTÇİ'ye, Sayın Yrd. Doç. Dr. Ahmet GÜRAL'a, çalışmada maddi olarak destek olan Gazi Üniversitesi (DPT-2003 K120470-19) kurumunun ilgili birimlerine ve bu destekte hakkı olan herkese teşekkür ederim. Ayrıca çalışmalarımda emeği geçen arkadaşlarım Dr. Yakup TURGUT'a, Dr. Gökhan SUR'a, Dr. Alaattin KAÇAL'a, Arş. Gör. Hanifi ÇİNİCİ'ye, Arş. Gör. Volkan KILIÇLI'ya, Ersin BAHÇECİ'ye, lisansüstü çalışmalarım süresince desteklerini esirgemeyen G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü personeline teşekkürü bir borç bilirim.

Ayrıca maddi ve manevi her türlü konuda bana destek olan sevgili eşime, akademik çalışmalarımın yoğunluğuna bağlı olarak kendileri ile gerektiği kadar zaman geçiremediğimi düşündüğüm sevgili kızım ve oğluma sevgi ve şükranlarımı sunarım.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	xiv
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	xv
RESİMLERİN LİSTESİ	xix
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xxii
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	5
2.1. MMK’ların Üretimleri ve Mekanik Özellikleri ile İlgili Yapılan Çalışmalar	5
2.2. MMK’ların İşlenebilirlikleri ile İlgili Yapılan Çalışmalar.....	17
2.3. Literatür Araştırmasının Değerlendirilmesi	30
2.3.1. MMK’ların üretimi ve mekanik özellikleri ile ilgili literatür özeti.....	30
2.3.2. MMK’ların işlenebilirlikleri ile ilgili literatür özeti.....	31
2.3.3. Genel değerlendirme	33
3. KOMPOZİT MALZEMELER.....	34
3.1. Kompozit Malzemelerin Tanımı ve Sınıflandırılması.....	34
3.2. Matris Malzemeleri ve Özellikleri	35
3.2.1. Alüminyum (Al) ve Al alaşımları	36
3.2.2. Titanyum alaşımları.....	37
3.2.3. Magnezyum alaşımları	37

Sayfa

3.2.4. Bakır alaşımları	38
3.3. Takviye Malzemeleri ve Özellikleri	39
3.3.1 Fiberler	40
3.3.2. Kılcal kristaller	42
3.3.3. İnce yassı parçacıklar ve/veya plakalar	43
3.3.4. Parçacık ve partiküller.....	44
3.4. Metal Matrisli Kompozitler.....	45
3.4.1. Parçacık takviyeli MMK	49
3.4.2. Sürekli fiber takviyeli MMK.....	50
3.4.3. Kısa fiber takviyeli MMK	51
3.4.4. Rasgele düzlemsel yönlendirilmiş (plaka) takviyeli MMK	51
3.4.5. Dağılım ile güçlendirilmiş MMK.....	52
3.5. Metal Matrisli Kompozitlerin Üretim Yöntemleri	53
3.5.1. Sıvı hal üretim yöntemleri	54
3.5.2. Katı hal üretim yöntemleri	64
3.5.3. Sıvı-Katı hal üretim yöntemleri.....	70
4. TOZ METALURJİSİ	73
4.1. Toz Metalurjisi Teknolojisinin Özellikleri.....	73
4.1.1. Toz metalurjisinin önemi	75
4.1.2. Toz metalurjisinin sınırlılıkları ve zayıf yönleri.....	76
4.2. Toz Üretimi	76
4.2.1. Mekanik üretim yöntemleri	77
4.2.2. Elektrolizle üretim yöntemleri	79

	Sayfa
4.2.3. Kimyasal üretim yöntemleri	80
4.2.4. Atomizasyon yöntemleri	82
4.3. Tozların Öğütülmesi ve Karıştırılması	86
4.4. Tozların Sıkıştırılması	88
4.4.1. Sıkıştırma yöntemleri	91
4.5. Sinterleme.....	96
4.5.1. Katı-hal sinterleme teorisi	97
4.5.2. Sıvı fazlı sinterleme.....	101
4.5.3. Sinterleme atmosferleri ve etkileri	102
4.6. Bitirme İşlemleri.....	104
5. TALAŞLI İMALAT VE İŞLENEBİLİRLİK	106
5.1. Metal Kesme Mekanîği	107
5.2. Takım-Talaş Arayüzeyi ve Yığıntı Talaş Oluşumu	109
5.3. Talaşlı İmalat İşleminde Kesme Kuvvetleri	110
5.4. Talaşlı İmalat İşleminde Isı ve Sıcaklık	111
5.5. Kesici Takım	113
5.5.1. Kesici takım geometrisi.....	113
5.5.2. Kesici takım malzemeleri	114
5.6. Takım Aşınması	118
5.6.1. Aşınma mekanizmaları.....	120
5.6.2. Aşınma tipleri	122
5.7. İşlenebilirlik.....	124

Sayfa

6. MATERYAL ve METOT	127
6.1. Matris Malzemesi	127
6.2. MMK Üretiminde Kullanılan Takviye Elemanı	127
6.2.1. Takviye elemanı biçim incelemesi	128
6.2.2. Parçacık boyut analizleri	128
6.3. Kompozit Numunelerin Üretimi	129
6.3.1. Numunelerin hazırlanması	129
6.3.2. Tozların preslenmesi	130
6.3.3. Numunelerin sinterlenmesi	132
6.3.4. Yoğunluk hesaplamaları	132
6.3.5. Sertlik Ölçümü	133
6.3.6. Çapraz kırılma mukavemeti ölçümü	134
6.4. Numunelerin İşlenebilirlik Özelliklerinin Belirlenmesi	135
6.4.1. Takım tezgahı, takım tutucular ve kesici takımlar	135
6.4.2. Numunelerin bağlanması	137
6.4.3. Kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazları	138
7. SONUÇLAR ve TARTIŞMA	140
7.1. Malzeme Özellikleri	140
7.1.1. Matris ve takviye elemanının boyut analizi	140
7.1.2. Kompozit numunelerin metalografik incelemeleri	141
7.1.3. Yoğunluk sonuçlarının değerlendirilmesi	144
7.1.4. Sertlik ve çapraz kırılma mukavemeti	146

Sayfa

7.2. İşlenebilirlik Özellikleri	147
7.2.1. Kesme kuvvetlerinin değerlendirilmesi	147
7.2.2. Yüzey pürüzlülüğünün değerlendirilmesi	177
8. SONUÇ ve ÖNERİLER.....	189
KAYNAKLAR	193
EKLER.....	204
EK-1 SiC parçacıkların boyut analizi	205
ÖZGEÇMİŞ	206

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3.1. Çeşitli parçacık tipindeki takviye elemanlarının tipik özellikleri.....	45
Çizelge 6.1. Matris malzemesinin (Alumix 231) özellikleri	127
Çizelge 6.2. SiC'ün bazı mekanik ve fiziksel özellikleri	128
Çizelge 6.3. Numune karışım oranları.....	130
Çizelge 6.4. BSD torna tezgahının teknik özellikleri.....	135
Çizelge 6.5. Kesici takımların kodları ve özellikleri.....	136
Çizelge 6.6. Deneylerde kullanılan kesme parametreleri ve seviyeleri	137
Çizelge 6.7. Yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazının teknik özellikleri	138
Çizelge 7.1. Malzemelerin ham yoğunluk ve sinterleme sonrası yoğunlukları.....	144
Çizelge 7.2. Numunelerin sertlik ve ÇKM değerleri.....	146
Çizelge 7.3. Ortalama yüzey pürüzlülüğü (R_a) sonuçları.....	178

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 3.1. Fiber çapının çekme dayanımı üzerine etkisi.....	41
Şekil 3.2. Altıgen hücreli petekli yapı.....	43
Şekil 3.3. Değişik malzeme sınıflarının çalışma sıcaklıkları ve mukavemet/ ağırlık oranlarına göre performans haritaları.....	47
Şekil 3.4. MMK malzemelerin üretim yöntemleri	54
Şekil 3.5. Ergimiş metalin yerçekimi ile kendiliğinden sızma özelliği.....	58
Şekil 3.6. Ergimiş metalin yukarı yönlü sızma özelliği ve vakum ile önceden kalıplanmış takviye elemanlarına emdirilmesi	58
Şekil 3.7. Ergimiş metalin aşağı yönlü sızma özelliği ve gaz basıncı ile önceden hazırlanmış takviye elemanlı kalıba emdirilmesi	59
Şekil 3.8. Mekanik basınçla ergimiş metalin ön form verilmiş takviye elemanlı kalıba emdirilme işlemi	59
Şekil 3.9. Sıvı metal karıştırma-basınçlı döküm yöntemi a) Sıvı metal-takviye elemanı karıştırma ünitesi b) Kalıba dökülen karışıma basınç uygulanması	61
Şekil 3.10. Püskürtme biriktirmeli döküm ünitesinin şematik görünüşü	62
Şekil 3.11. Reaksiyon yönteminin şematik gösterimi.....	64
Şekil 3.12. Toz metalurjisi ürünlerinin üretim basamakları.....	66
Şekil 3.13. Sabit sıcaklık ve basınç altında difüzyonlu birleştirme işlemi.....	68
Şekil 3.14. Uçak motoru tribün kanatçığı üretim işlem basamakları	68
Şekil 3.15. Sıcak ve soğuk haddeleme ile kompozit üretim işlem basamakları	69
Şekil 3.16. Osprey yönteminin şematik gösterimi	70
Şekil 4.1. Toz metalurjisinde parça üretim iş akışı adımları.....	74
Şekil 4.2. Toz metalurjisindeki muhtemel parçacık şekilleri.....	77

Şekil	Sayfa
Şekil 4.3. Öğütme yöntemiyle toz üretimi	78
Şekil 4.4. Mekanik alaşımlama	79
Şekil 4.5. Elektroliz yolu ile üretimin şematik gösterimi	80
Şekil 4.6. Gaz atomizasyon ünitesi a) Yatay, b) Dikey	83
Şekil 4.7. Su atomizasyonu ünitesi	84
Şekil 4.8. Savurmalı atomizasyon ünitesi a) Dönen disk ile savurmalı atomizasyon b) Döner elektrolit ile savurmalı atomizasyon	85
Şekil 4.9. Yüksek enerjili atritörün şematik görünümü	87
Şekil 4.10. Bilyalar arasında ezilen kompozit tozların şematik görünümü	88
Şekil 4.11. Tozların sıkıştırılmasında işlem sırası	89
Şekil 4.12. TM parçaların dört sınıfı (yandan görünüşleriyle; enine kesitleri daireseldir)	92
Şekil 4.13. Tek hareketli sıkıştırma a) Kalıbın şematik gösterimi, b) Yoğunluk dağılımı	93
Şekil 4.14. Çift hareketli sıkıştırma a) Kalıbın şematik gösterimi, b) Yoğunluk dağılımı	94
Şekil 4.15. Çift hareketli alternatif sıkıştırma	94
Şekil 4.16. Soğuk izostatik sıkıştırma	95
Şekil 4.17. İki küresel parçacığın sinterleme profili	97
Şekil 4.18. Parçacıklar arasındaki sinter bağının atomik düzeyde gösterimi.....	98
Şekil 4.19. Sinterleme aşamalarının şematik gösterimi	99
Şekil 4.20. İki tip sinterleme mekanizması	100
Şekil 4.21. Sıvı fazlı sinterlemede katı tanelerin sıvı ile ıslatılması	101

Şekil	Sayfa
Şekil 4.22. Sıvı faz sinterlemenin kavramsal aşamaları.....	102
Şekil 5.1. Dik kesme modeli	107
Şekil 5.2. Plastik deformasyon bölgeleri	108
Şekil 5.3. Tornalama işleminde kesme kuvvetleri	110
Şekil 5.4. Kesme bölgesinde ısı oluşumu.....	111
Şekil 5.5. Tek noktadan kesme yapan bir kesici takımın geometrisi	113
Şekil 5.6. Temel aşınma mekanizmalarının şematik olarak gösterilmesi	120
Şekil 5.7. İşlenebilirliği etkileyen faktörler.....	125
Şekil 6.1. Çapraz kırılma numunelerinin preslenmesinde kullanılan kalıp ve zımbalar	130
Şekil 6.2. Çapraz kırılma numunesinin preslenmesini gösteren şematik resim.....	131
Şekil 6.3. Numune presleme kalıbı ve preslenmiş numunenin şekli	131
Şekil 6.4. Sinterleme işleminin şematik gösterimi.....	132
Şekil 6.5. Çapraz kırılma deney aparatının şematik gösterimi	134
Şekil 6.6. İşlenebilirlik deneylerinde kullanılan takım tutucu özellikleri	136
Şekil 6.7. Bağlama aparatına, üretilen malzemelerin yerleştirilmesi.....	137
Şekil 7.1. Al-Si faz diyagramı.....	141
Şekil 7.2. Numunelerin ham ve sinterlenmiş yoğunluklarının karşılaştırılması	145
Şekil 7.3. Numunelerin sertlik ve çapraz kırılma mukavemetindeki değişimler	146
Şekil 7.4. Alumix 231 kodlu numune için kesme hızına göre F_c değişimi a) $f=0,1$ mm/rev; b) $f=0,2$ mm/rev	148
Şekil 7.5. Alumix 231 kodlu numune için kesici takım kalitelerine göre kesme kuvvetlerinin değişimi a) SK kesici, $f= 0,1$ mm/rev, b) SK kesici, $f= 0,2$ mm/rev c) KBN kesici, $f= 0,1$ mm/rev, d) KBN kesici, $f= 0,2$ mm/rev e) ÇKE kesici, $f= 0,1$ mm/rev, f) ÇKE kesici, $f= 0,2$ mm/rev.....	150

Şekil	Sayfa
Şekil 7.6. %5 SiC kodlu numune için kesme hızına göre F_c değişimi a) $f=0,1$ mm/rev, b) $f=0,2$ mm/rev	156
Şekil 7.7. %5 SiC kodlu numune için kesici takım kalitelerine göre kesme kuvvetlerinin değişimi a) SK kesici, $f=0,1$ mm/rev, b) SK kesici, $f=0,2$ mm/rev c) KBN kesici, $f=0,1$ mm/rev, d) KBN kesici, $f=0,2$ mm/rev e) ÇKE kesici, $f=0,1$ mm/rev, f) ÇKE kesici, $f=0,2$ mm/rev	158
Şekil 7.8. %10 SiC kodlu numune için kesme hızına göre F_c değişimi a) $f=0,1$ mm/rev, b) $f=0,2$ mm/rev	163
Şekil 7.9. %10 SiC kodlu numune için kesici takım kalitelerine göre kesme kuvvetlerinin değişimi a) SK kesici, $f=0,1$ mm/rev, b) SK kesici, $f=0,2$ mm/rev c) KBN kesici, $f=0,1$ mm/rev, d) KBN kesici, $f=0,2$ mm/rev e) ÇKE kesici, $f=0,1$ mm/rev, f) ÇKE kesici, $f=0,2$ mm/rev	165
Şekil 7.10. %15 SiC kodlu numune için kesme hızına göre F_c değişimi a) $f=0,1$ mm/rev, b) $f=0,2$ mm/rev	170
Şekil 7.11. %15 SiC kodlu numune için kesici takım kalitelerine göre kesme kuvvetlerinin değişimi a) SK kesici, $f=0,1$ mm/rev, b) SK kesici, $f=0,2$ mm/rev c) KBN kesici, $f=0,1$ mm/rev, d) KBN kesici, $f=0,2$ mm/rev e) ÇKE kesici, $f=0,1$ mm/rev, f) ÇKE kesici, $f=0,2$ mm/rev	172
Şekil 7.12. Alumix 231 kodlu numune için kesme hızına göre R_a değişimi a) $f=0,1$ mm/rev, b) $f=0,2$ mm/rev	179
Şekil 7.13. %5 SiC kodlu numune için kesme hızına göre R_a değişimi a) $f=0,1$ mm/rev, b) $f=0,2$ mm/rev	181
Şekil 7.14. %10 SiC kodlu numune için kesme hızına göre R_a değişimi a) $f=0,1$ mm/rev, b) $f=0,2$ mm/rev	183
Şekil 7.15. %15 SiC kodlu numune için kesme hızına göre R_a değişimi a) $f=0,1$ mm/rev, b) $f=0,2$ mm/rev	185
Şekil 7.16. R_a 'nın kesme hızı ve ilerlemeye göre değişimi a) SK takım; b) KBN takım; c) ÇKE takım	187

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 5.1. Aşınma tipleri	123
Resim 6.1. Karışım cihazı	129
Resim 7.1. Matris ve takviye elemanının SEM görüntüsü a) Alumix 231; b) SiC _p	140
Resim 7.2. Alumix 231'in mikroyapı fotoğrafları a) x50, b) x100 büyütme	142
Resim 7.3. %5 SiC numunenin mikroyapı fotoğrafları a) x50, b) x100 büyütme	143
Resim 7.4. %10 SiC numunenin mikroyapı fotoğrafları a) x50, b) x100 büyütme	143
Resim 7.5. %15 SiC numunenin mikroyapı fotoğrafları a) x50, b) x100 büyütme	144
Resim 7.6. Alumix 231 kodlu numunenin SK ile işlenmesinde oluşan SEM görüntüleri a) V=75 m/min, f=0,1 mm/rev, b) V=300 m/min, f=0,1 mm/rev	151
Resim 7.7. Alumix 231 kodlu numunenin KBN ile işlenmesinde oluşan SEM görüntüleri a) V=75 m/min, f=0,1 mm/rev, b) V=300 m/min, f=0,1 mm/rev	152
Resim 7.8. Alumix 231 kodlu numunede 0,1 mm/rev ilerleme ve 75 m/min kesme hızında oluşan talaş kökü a) SK kesici takım, b) KBN kesici takım.....	153
Resim 7.9. Alumix 231 kodlu numunenin ÇKE ile işlenmesinde oluşan SEM görüntüleri a) V=75 m/min, f=0,1 mm/rev, b) V=300 m/min, f=0,1 mm/rev	154
Resim 7.10. Alumix 231 kodlu numunenin ÇKE ile işlenmesinde oluşan talaş kökü fotoğrafı	155
Resim 7.11. %5 SiC kodlu numunenin SK ile işlenmesinde oluşan SEM görüntüleri a) V=75 m/min, f=0,1 mm/rev, b) V=300 m/min, f=0,1 mm/rev	159

Resim	Sayfa
Resim 7.12. %5 SiC kodlu numunenin KBN ile işlenmesinde oluşan SEM görüntüleri a) V=75 m/min, f=0,1 mm/rev, b) V=300 m/min, f=0,1 mm/rev	160
Resim 7.13. SiC kodlu numunede 0,1 mm/rev ilerleme ve 75 m/min kesme hızında oluşan talaş kökü a) SK kesici takım, b) KBN kesici takım.....	160
Resim 7.14. %5 SiC kodlu numunenin ÇKE ile işlenmesinde oluşan SEM görüntüleri a) V=75 m/min, f=0,1 mm/rev, b) V=300 m/min, f=0,1 mm/rev	161
Resim 7.15. %5 SiC kodlu numunenin ÇKE ile işlenmesinde oluşan talaş kökü fotoğrafı	162
Resim 7.16. %10 SiC kodlu numunenin SK ile işlenmesinde oluşan SEM görüntüleri a) V=75 m/min, f=0,1 mm/rev, b) V=300 m/min, f=0,1 mm/rev	166
Resim 7.17. %10 SiC kodlu numunenin KBN ile işlenmesinde oluşan SEM görüntüleri a) V=75 m/min, f=0,1 mm/rev, b) V=300 m/min, f=0,1 mm/rev	167
Resim 7.18. %10 SiC kodlu numunede 0,1 mm/rev ilerleme ve 75 m/min kesme hızında oluşan talaş kökü a) SK kesici takım, b) KBN kesici takım.....	168
Resim 7.19. %10 SiC kodlu numunenin ÇKE ile işlenmesinde oluşan SEM görüntüleri a) V=75 m/min, f=0,1 mm/rev, b) V=300 m/min, f=0,1 mm/rev	168
Resim 7.20. %10 SiC kodlu numunenin ÇKE ile işlenmesinde oluşan talaş kökü fotoğrafı	169
Resim 7.21. %15 SiC kodlu numunenin SK ile işlenmesinde oluşan SEM görüntüleri a) V=75 m/min, f=0,1 mm/rev, b) V=300 m/min, f=0,1 mm/rev	174
Resim 7.22. %15 SiC kodlu numunenin KBN ile işlenmesinde oluşan SEM görüntüleri a) V=75 m/min, f=0,1 mm/rev, b) V=300 m/min, f=0,1 mm/rev	174
Resim 7.23 %15 SiC kodlu numunenin SK ile işlenmesinde oluşan talaş kökü fotoğrafı	175

Resim	Sayfa
Resim 7.24. %15 SiC kodlu numunenin ÇKE ile işlenmesinde oluşan SEM görüntüleri a) V=75 m/min, f=0,1 mm/rev, b) V=300 m/min, f=0,1 mm/rev	175
Resim 7.25. %15 SiC kodlu numunenin ÇKE ile işlenmesinde oluşan talaş kökü fotoğrafı	176
Resim 7.26. Alumix 231 kodlu numunenin SK ile işlenmesinde oluşan yüzey fotoğrafı (V=300 m/min; f=0,2 mm/rev).....	180
Resim 7.27. %5 SiC kodlu numune için 300 m/min kesme hızı ve 0,2 mm/rev ilerlemede oluşan yüzey fotoğrafları	182
Resim 7.28. %10 SiC kodlu numune için 300 m/min kesme hızı ve 0,2 mm/rev ilerlemede oluşan yüzey fotoğrafları	184
Resim 7.29. %15 SiC kodlu numune için 300 m/min kesme hızı ve 0,2 mm/rev ilerlemede oluşan yüzey fotoğrafları	186

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklama
A	Talaş kesit alanı, mm ²
a	Kesme derinliği, mm
f	İlerleme miktarı, mm/rev
V	Kesme hızı, m/min
F_c	Esas kesme kuvveti, N
F_r	Radyal kuvvet, N
F_f	İlerleme kuvveti, N
P	Basınç, kg/mm ²
t	Deforme olmamış talaş kalınlığı, mm
t_c	Deforme olmuş talaş kalınlığı, mm
w	İş parçası genişliği, mm
r	Kesici takım uç yarıçapı, mm
l_s	Kayma düzlemi uzunluğu, mm
φ	Kayma düzlemi açısı, (°)
γ	Kesici takım talaş açısı, (°)

Kısaltmalar	Açıklama
MMK	Metal Matrisli Kompozit
SMK	Seramik Matrisli Kompozit
PMK	Polimer Matrisli Kompozit
TM	Toz Metalurjisi
MA	Mekanik Alaşımlama
ÇKM	Çapraz Kırılma Mukavemeti
HIP	Sıcak İzostatik Presleme
CIP	Soğuk İzostatik Presleme
CNC	Computer Numerical Control (Bilgisayarlı sayısal denetim)
PVD	Physical Vapour Deposition (Fiziksel buhar çökeltme)
CVD	Chemical Vapour Deposition (Kimyasal buhar biriktirme)
SEM	Scanning Electron Microscope (Tarama elektron mikroskobu)
Al₂O₃	Aluminyum oksit
TiAlN	Titanyum alüminyum nitrür
TiC	Titanyum karbür
TiCN	Titanyum karbon nitrür
TiN	Titanyum nitrür
SiC	Silisyum karbür
B₄C	Bor karbür
WC	Tungsten Karbür
VSD	Vickers Sertlik Değeri
HSS	High Speed Steel (Yüksek hız çeliği)
SK	Sementit Karbür
KBN	Kübik Bor Nitrür
ÇKE	Çok Kristalli Elmas
YT	Yığıntı Talaş

1. GİRİŞ

Sanayi devrimi ile beraber makineleşme çağının başlaması ve bunun sonucunda insan gücü ile yapılan birçok işin makineler yardımıyla yapılması, insanoğlunu yeni araştırma alanlarına yöneltmiştir. Teknolojideki hızlı gelişmeler sonucunda araştırmalar ürünlerini vermeye başlamış ve geleneksel malzemelere oranla daha üstün özelliklere sahip yeni malzemeler üretilmiştir [1]. Yeni geliştirilen malzemelerden birisi de kompozit malzemelerdir. Kompozit malzemelerin düşük yoğunluğa karşı sergiledikleri mükemmel dayanım özellikleri, farklı birleşim ve geometrilerde üretilebilmeleri, yorulma, tokluk, yüksek sıcaklık, oksitlenme ve aşınma dayanımlarının yüksek olması nedeniyle demiryolu, otomotiv, uzay ve spor gibi endüstriyel alanlarda gün geçtikçe kullanımları artmaktadır [2]. Kompozit malzemelerde ve üretim yöntemlerindeki farklılıklar sebebiyle, bu yeni nesil mühendislik malzemelerinde sınıflandırılma gereği duyulmuştur. Üretimlerinde kullanılan ana malzemelere göre; Metal Matrisli Kompozit (MMK), Seramik Matrisli Kompozit (SMK) ve Polimer Matrisli Kompozit (PMK) malzemeler olarak genel bir sınıflandırılma yapılmaktadır.

Kompozitler, aralarında kimyasal ya da fiziksel farklılıklar bulunan en az iki farklı geleneksel malzemenin, çeşitli yöntemlerle makro düzeyde bir araya getirilmesi sonucu oluşan karma yapılı malzemelerdir [2, 3]. Kompozit yapı; matris (ana faz) malzemesi, takviye elemanı ve ara yüzey bağı olmak üzere üç bileşenden meydana gelmektedir. Burada; matris fazı kompozitin tasarlanan biçiminde takviye elemanlarını yer değiştirmeye olanak vermeden bir arada tutmak ve uygulanan dış kuvvetleri herhangi bir değişime uğramadan karşı koyarak, ara yüzey bağı vasıtası ile takviye elemanlarına dağıtıp iletmekle görevlidir. Takviye elemanının görevi ise, matrisi malzeme ve şekil itibarı ile güçlendirmek ve matris tarafından iletilen yükü taşımak ya da takviye elemanı tipine bağlı olarak değişen oranlarda matris ile paylaşmakla sorumludur. Ara yüzey bağı da, matrisin takviye elemanına iletmek istediği yükü her hangi bir deformasyona uğramadan takviye elemanlarına iletilmesini sağlamakla görevlidir [3, 4]. Mükemmel dayanım özelliklerine sahip kompozitler, uzun süre kullanıma elverişli olmaları nedeniyle çevrenin korunması,

hammadde tasarrufu sağlamaları ve aynı zamanda enerji, emek gibi önemli üretim girdilerini azaltmalarına dayalı olarak ekonomik bir malzeme grubudur.

Mühendislik malzemelerin yeni bir sınıfı olan MMK malzemelerin özelliklerini iyileştirmek için metal matris içerisine SiC, Al₂O₃ fiberleri ve/veya parçacıkları gibi seramik takviye elemanları eklenmektedir. Bu şekilde, metallerin süneklik ve tokluğu, seramiklerin yüksek mukavemet ve yüksek elastikiyet modülü özelliklerinin birleştirilmeleri neticesinde son derece önemli mühendislik malzemeleri ortaya çıkmıştır. Bu tür kompozitler gerek kullanım alanının genişlemesi ve yüksek üretim potansiyeli ve gerekse üretim ekonomisi açısından tercih edilmekle beraber [5] üretimde karşılaşılan matris-takviye elemanı ara yüzey bağının istenilen biçimde oluşmaması, homojen bir yapının sağlanamaması gibi problemler ile üretim yöntemlerinin zor ve zahmetli olması nedeniyle, MMK üretim yöntemlerini geliştirme çalışmaları devam etmektedir. Örneğin; Parçacık takviyeli MMK malzemelerin üretiminde, Toz Metalurjisi (TM) yönteminin bir katı hal üretim yöntemi olmasına rağmen, döküm gibi sıvı hal yöntemlerine tercih edilmesinin en önemli sebeplerinden birisi de bu yöntemlerle daha homojen bir yapının kolaylıkla elde edilebilmesidir. Takviye elemanı boyutu ve ağırlık/hacim oranına bağlı olan homojen dağılım problemi ile oluşan matris-parçacık kimyasal tepkimeleri döküm yerine TM metodu ile rahatlıkla aşılabilmektedir [6].

Toz metalurjisi yöntemiyle üretilen MMK malzemelerin önemli bir kısmını hafif metal esaslı malzemeler teşkil etmektedir. Hafif metaller yüksek fiziksel ve mekanik özelliklere sahip olup bunlardan alüminyum ve alaşımlarının TM endüstrisinde kullanımı giderek artmaktadır. Hafif metallerin en yaygını olan alüminyum ve alaşımlarının matris malzemesi olarak tercih edilmesinin nedenleri; ağırlık/hacim oranlarına göre yüksek dayanım ve korozyon direnci ile düşük ergime sıcaklıkları gibi üstün özellikleridir. Bununla birlikte döküm sırasında alüminyum yüzeyinde oluşan ince fakat kararlı oksit tabakasından dolayı bazı sorunlar yaşanmakta olup presleme işlemi sayesinde oksit tabakası alüminyum tozunun plastik deformasyonu ile kırılabilmekte ve sıvı faz sinterleme yoluyla uygun bir düzeye indirilebilmektedir [7].

MMK malzemeler, bünyelerindeki aşındırıcı özelliğe sahip sert takviye elemanlarından dolayı, ikincil işlemler ve özellikle talaşlı imalatla şekillendirilmelerinin zor olmasına bağlı olarak henüz otomotiv ve uzay uygulamalarında yaygın olarak kullanılamamaktadır [8]. Sıkıştırılmalı döküm ve TM gibi yakın-net şekilli üretim yöntemlerinde bile üretim maliyeti minimuma indirilmesine rağmen, işleme ihtiyacı tamamıyla yok edilememekte ve tasarlanan geometrilerde parçaların üretimi için malzemenin talaşlı imal usulleri ile işlenmesi gerekmektedir. Bundan dolayı MMK'ların işlenmesi çok önemlidir [9]. Aşındırıcı özelliğe sahip takviye elemanlarının hızlı kesici takım aşınmalarına sebep olmaları işleme maliyetlerini arttırmaktadır. Yapılan çalışmalarda, MMK malzemelerin verimli bir şekilde işlenmesinde sadece tek kristalli ya da çok kristalli elmas (TKE, ÇKE) kesici takımların kullanılabileceği fakat bunlarında pahalı ve formlarının da kısıtlı olması (vida açma, küçük boyutlu kesiciler ve rayba gibi özel tasarımı kesicilerde kullanılamıyor olmaları) gibi dezavantajlı yanlarının var olduğu rapor edilmiştir [10]. Bununla birlikte araştırmacılar, MMK malzemeler gibi aşınma dayanımı yüksek kompozitlerin, üretimlerinin istenilen forma yakın gerçekleştirilmesini ve karbür kesici takımlar ile kübik bor nitrürlü (KBN) kesici takımlarla kaba talaş alma işlemlerinin, elmas kesici takımlarla da bitirme talaş alma işlemlerinin yapılmasını önermektedir [10, 11].

Bu çalışmada, Al-Si alaşımı matrisli SiC parçacık takviyeli MMK malzemenin toz metalurjisi yöntemiyle üretilmesi ve üretilen malzemelerin karakterizasyon işlemlerinin (mikroyapı, sertlik, yoğunluk ölçümü ve çapraz kırılma dayanımı açısından) yapılması hedeflenmiştir. Ayrıca, üretimi gerçekleştirilen kompozitler üzerinde yapılan işlenebilirlik deneyleri (talaş oluşumu, kesme kuvveti, yüzey kalitesi kriterleri açısından) ile işleme maliyetleri ve optimum kesme parametrelerinin belirlenmesi hedeflenmiş olup endüstriyel uygulamalarda bu tür kompozitlerin kullanım alanlarının yaygınlaştırılması amaçlanmaktadır. Çalışmada amaca ulaşmak için aşağıda belirtilen aşamalar gerçekleştirilmiştir:

- Toz metalurjisi yöntemi kullanılarak MMK numunelerin üretilmesi ve üretilen numunelerin karakterizasyon işlemlerinin yapılması. Bu süreçte, başlangıçta numunenin takviye fazını oluşturan SiC parçacıklar ile matris fazı Al-Si alaşımı tozlar farklı ağırlık oranlarında üç boyutlu toz karışımı sağlayan bir cihaz yardımıyla karıştırılmış ve karışım tozlar çift hareketli bir kalıpta sıkıştırılarak silindirik halka şeklinde numuneler üretilmiştir. Daha sonra, sıkıştırılan numuneler sinterlenmiş ve numunelerin karakterizasyon işlemleri gerçekleştirilmiştir.
- Literatür incelemesi ve kesici takım firmasının önerileri doğrultusunda önceden belirlenen kesme parametrelerine göre Kistler 9257B tipi dinamometre yardımıyla kesme kuvvetlerinin ölçülmesi. Kesme kuvveti bileşenlerinin kesme parametreleri ve numune karışım oranları ile olan ilişkilerinin belirlenmesi,
- MMK numunelerin tornalanması sırasında kesme parametrelerine göre değişen talaş biçimlerinin ve talaş oluşumunun talaş kökü morfolojisine göre değerlendirilmesi,
- Kesme deneyleri sonucunda MMK numunelerde meydana gelen yüzey pürüzlülüklerinin ölçülmesi, kesme parametrelerine ve MMK numunelerin içeriğine göre değerlendirilmesidir.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Kompozit malzemeler, düşük ağırlık/dayanım oranı ve iyileştirilmiş özellikleriyle yeni mühendislik malzemelerinin geliştirilmesini amaçlayan bir dizi araştırma-geliştirme çalışmasının sonucudur. Kompozit malzemeler arasında, seramik elyaf/parçacık/whisker takviyeli metal matris kompozitler, yüksek dayanım, yüksek aşınma dayanımı ve ısıl kararlılık gibi üstün mekanik özellikleri nedeniyle giderek artan bir uygulama alanı bulmaktadır [12, 13]. Metal Matrisli Kompozit (MMK) malzemeler, 1970'lerden beri uzay ve havacılık endüstrilerinde başarıyla uygulanmakta ve bugünlerde enerjinin verimli kullanılması açısından kullanımı önem kazanmaktadır [14]. Ayrıca, düşük maliyet ve tekrar elde edilebilir mikroyapı ve özellikleri sağlayan süreçler nedeniyle parçacık takviyeli MMK'ler, havacılık ve savunma ile ilgili sektörlerin yanı sıra taşımacılık, spor ve elektronik sanayiinde de kullanım alanı bulmaktadır. Parçacık takviyeli MMK'lar, izotropik davranış gösterdiğinden ve ekstrüzyon, hadde ve dövme gibi geleneksel metal şekillendirme işlemleriyle şekil verilebildiğinden diğer kompozitlere karşı ilave avantajlara sahiptir [15]. Bu amaçla kompozit malzemelerin üretimleri-mekanik özellikleri ve işlenebilirlikleri ile ilgili yapılan çalışmalar iki parça halinde aşağıda özetlenmiştir.

2.1. MMK'ların Üretimleri ve Mekanik Özellikleri ile İlgili Yapılan Çalışmalar

MMK malzemeler, çok çeşitli yöntemlerden yararlanılarak üretilmekte olup üretimler sonucunda elde edilen kompozit malzemeler üzerinde bir dizi mekanik özellik belirleme testleri yapılmaktadır. MMK'ların üretimi ve mekanik özellikleri üzerine yapılan çalışmalardan bazıları aşağıda sunulmuştur.

Hashim ve ark. (2001), MMK'ların ergimiş metal karıştırma yönteminde seramik parçacıklar ile ergimiş alüminyum matris alaşımı arasındaki ıslatabilirliği iyileştirici yönde birçok araştırmanın yapılmakta olduğunu belirtmişlerdir. Bu metotlardan bazılarını pahalı ve karmaşık, bazılarını da ucuz ve basit teknikler olarak tespit etmişlerdir. Çalışmalarında, MMK'ların ergimiş metal karıştırma yöntemi ile üretimlerinde yeni bir uygulama geliştirmişlerdir. SiC parçacıkların A359

alüminyum alaşımı tarafından ıslatılmalarını kolaylaştırmak amacıyla özel olarak tasarlanmış üretim ekipmanları kullanarak ıslatabilirliğe, matris alaşımı, SiC_p ve magnezyum ilavesinin etkilerini araştırmışlardır. Üretimde kullandıkları karıştırma işleminde de değişik karıştırma şartlarında, karıştırma işleminin ıslatabilirliğe katkısını araştırmışlardır. Parçacıklarının ilave yüzde oranının elde edilen kompozit üzerindeki etkilerini belirlemek amacıyla; ıslatabilirlik ölçümleri, soğuma süresi ve SiC_p hacim oranının etkisini incelemişlerdir. Elde ettikleri deneysel sonuçlarda, SiC_p işlemsiz olarak kullanılmalarını, magnezyum alaşımının ıslatmada etkin rol oynadığını ve karıştırma işleminin karışımın döküm işlemine kadar sürekli olarak devam etmesi gerektiğini tespit etmişlerdir. Aynı zamanda karışımın soğuma hızının azaltılması ile ıslatabilirliğin iyileşirken, SiC_p hacim oranının artması ile ıslatabilirlik özelliğinin kötü yönde etkilendiğini belirtmişlerdir [16].

Hashim ve ark. (2002), MMK'ların takviye fazı dağılımının, homojen bir şekilde gerçekleşmesi için karıştırma işleminin etkili yapılmasının gerekli olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca, karıştırma işleminin kapalı bir pota içerisinde yapılıyor olması nedeniyle parçacıkların homojen karışımının gözlenemediğini, bu yüzden bir benzetim metodu geliştirerek karışımın incelenmesini gerektiğini vurgulamışlardır. Bu amaçla sonlu elemanlar analiz yöntemine göre çalışan, sıvıların hareketlerini ölçümleyen özel bir paket program (ANSYS/Flotran-CFD) kullanarak araştırmalarını gerçekleştirmişlerdir. Bu sayede metal matris içerisindeki parçacıkların karıştırma esnasında dağılımı ve hareketleri hakkında grafikler üzerinden yorum yaparak uygun karıştırma şartlarının belirlenmesi üzerinde durmuşlardır. Karıştırma parametrelerinin birbirini etkilediğini ve bazı deneylerde özel fiziksel durumların, geliştirdikleri model benzetiminin sınırlı kalmasına neden olduğunu vurgulamışlardır. Bu durumda geliştirdikleri modelin doğruluğunu görsel deneylerle ispat etmişler ve modelin MMK malzemelerin üretim parametrelerinin belirlenmesi için uygun bir yöntem olduğunu savunmuşlardır [17].

Lou ve ark. (2003), yüksek sıcaklıkta isostatik presleme yöntemiyle üretilen kompozitlerde ara yüzey reaksiyonlarını araştırmak için, aşınma dayanımı yüksek kobalt esaslı süper alaşım ve çelik matris malzemelere tungsten karbür (WC)

parçacıklar ilave etmişlerdir. Kompozit içerisindeki matris fazın kimyasal bileşiminin, matris ile WC parçacıklar arasındaki ara yüzey reaksiyonlarına ve WC parçacıkların yapısal kararlılıklarına önemli derecede etkide bulunduğunu tespit etmişlerdir. Matris ve takviye fazı arasındaki ara yüzey reaksiyonlarının bazı özelliklerinin difüzyon hareketlerinin hesaplanması ile açıklanabileceğini belirtmişlerdir. Kompozitlerin üç boyutlu aşınma davranışlarının incelenmesini, ASTM G65-91 standardına göre yaptıkları deneylerle belirlemişlerdir. Aşınma deneyleri sonucunda, kobalt esaslı süper alaşım matrisli kompozitlerin diğer kompozitlere göre daha iyi performans gösterdiğini tespit etmişlerdir [18].

Hyo ve ark. (2001), otomobillerde kullanılan klima kompresör pistonları üzerinde yaptıkları incelemelerde, bunların dayanım ve aşınma direncinin yüksek ve ağırlıkça hafif olmaları gerektiğini tespit etmişlerdir. Bu amaçla, silisyum karbür parçacıkları (SiC_p) ile takviye edilmiş Al-Si alaşımı matrise sahip MMK malzemeden kompresör pistonları üretmişlerdir. MMK numuneleri, toz metalürjisi yöntemiyle 30 MPa basınç 540°C – 570°C arası yüksek sıcaklıkta, vakumlayarak ve sonrasında 500°C 'de 8:1 oranında ekstrüzyon işlemine tabi tutarak üretmişlerdir. Ağırlıkça %10 ve %12 Si içerikli alüminyum alaşımı ve ağırlıkça %5-10 SiC_p takviyeli kompozitlerden ürettikleri kompresör pistonlarının, ekstrüzyon ve dövme yöntemleri kullanarak plastik şekillendirilmesiyle dayanım ve sertlik özelliklerinin arttığını vurgulamışlardır. Buna neden olarak, kompozit çubuklara uygulanan üretim sonrası şekillendirme işlemlerinin, matrisin plastik deformasyonu sonucunda, mikroyapının küçülmesi olarak göstermişlerdir. Ayrıca, %12 Si içerikli Al alaşımından üretilen kompozitlerin, %10 Si içerikli matris ile yapılan kompozit üretimlerine kıyasla sertliklerinin ve aşınma dayanımının daha fazla olduğunu ve aşınma dayanımının SiC_p miktarının artmasıyla birlikte arttığını belirtmişlerdir [10].

Tsunekawa ve ark. (2001), denge halinde faz oluşturarak kompozit malzeme üretme yöntemine *ultrasonik titreşim* ilavesi yaparak üretim esnasında takviye fazının yeni bir formda oluşmasını sağlamışlardır. Parçacıkların Al-Mg alaşımı tarafından ıslatılmasını kolaylaştırmak için elektro-manyetik karıştırma yöntemini kullanarak bir çözüm yolu geliştirmişlerdir. Bir oksijen tüpü kullanarak, ortama gaz hızı ile SiO_2

ilavesi sağlamışlardır. Ultrasonik titreşim ve elektro-manyetik karıştırma işlemleri ile SiO_2 parçacıkların ergimiş Al alaşımı içerisinde transferinin kolaylaştığını tespit etmişlerdir. Aynı zamanda oksijen gazı ile birlikte takviye ilavesinin yapılmasıyla parçacıkların Al alaşımı ile ekzotermal (*ısıveren*) reaksiyonlu olarak birleşmesini sağlamışlar ve bunun da erimiş matrisin ısısının artmasına neden olduğunu belirtmişlerdir. SiO_2 parçacıkların ilavesi esnasında, MgAl_2O ve Al_2O_3 formunda denge halinde oksit takviye elemanlarına dönüştüğünü tespit etmişlerdir. Ultrasonik titreşim uygulanmasının, sadece ilave işleminin gerçekleştirilmesi ve SiO_2 'lerin reaksiyon hızının artması değil aynı zamanda atmosferik gazlar tarafından meydana gelen reaksiyonların azalmasına da katkıda bulunduğunu belirtmişlerdir. Matris malzemesi olan Al-Mg alaşımının, SiO_2 parçacıkların reaksiyonu sonucu, üretim sonrasında Al-Si alaşımına dönüştüğünü bildirmişlerdir. SiO_2 parçacıkların oldukça ucuz olması, kompozit malzemenin ekonomik olarak üretilmesine katkıda bulunmasına rağmen kullanmış oldukları üretim yönteminin bir takım dezavantajlarının da olduğunu vurgulamışlardır. Bu dezavantajları; üretim zamanının uzun olması, SiO_2 parçacık transferinin yüksek sıcaklıklarda gerçekleştirilmesi, SiO_2 parçacıklarının ıslatılmasının zorluğu olarak belirtmişlerdir [19].

Daoud ve Abo-Elkhar (2002), sıvı karıştırma yöntemini kullanarak AlNi ve AlSi alaşımlarına Al_2O_3 ve ZrO_2 seramik parçacıklarını ilave ederek metal matrisli kompozit malzemeler üretmişlerdir. Yaklaşık olarak 400 gr ağırlığındaki matris alaşımını, ergime ısısının $50\text{ }^\circ\text{C}$ üzerinde ön ısıtılmış bir ergitme fırını içerisine koyarak, ortamda koruyucu atmosferin oluşumu için 3 dakika boyunca sürekli olarak azot gazı göndererek, matris yüzeyinin oksitlemesini engellemişler ve sıvı hale geçmesini sağlamışlardır. Ergimiş matris ısısının $100\text{ }^\circ\text{C}$ üzerine çıkıldığında, 700 rev/min karıştırma hızında karıştırıcıyı devreye alarak, takviye fazının (Al_2O_3 ve ZrO_2) el ile ilavesini gerçekleştirmişlerdir. Karıştırma işlemini takiben karışımı $200\text{ }^\circ\text{C}$ ön ısıtılmış $30\times 40\text{ mm}^2$ dökme demir kalıp içerisine dökerek MMK'ların üretimlerini gerçekleştirmişlerdir. Ürettikleri kompozit malzemelerin mikroyapı incelemeleri sonrasında, α -Al'un tüm kompozitlerde takviye elemanlarının üzerinde çekirdeklenmediğini saptamışlardır. Parçacıkların genelde Al matrisin son katılacak kısımlarında parçacık tipi ve boyutuna bağlı olmadan yerleştiğini gözlemişlerdir. Bu

sebepten dolayı matris-takviye elemanı arasında termal difüzyonun uygun olmadığını vurgulamışlardır. SEM incelemeleri sonrasında, AlSi alaşımı içerisinde takviye elemanlarının ötektoit silisyum üzerinde değişiklik yapma eğiliminde olduğunu tespit etmişlerdir. Aynı zamanda AlNi alaşımına parçacıkların ilavesi ile elde edilen kompozitlerde dikkate değer bir NiAl_3 fazı oluşumunun gözlenmediğini belirtmişlerdir [20].

Carreno-Morelli ve ark. (1998), ergimiş metalin seramik takviye elemanlarına tek yönlü emdirilmesi yöntemi (infiltrasyon) ile çalışan MMK malzeme üretim sistemi kurmuşlardır. Bu MMK üretim sistemi ile kısa veya uzun Al_2O_3 elyaflara, Al ve Mg alaşımlarını emdirerek kompozit malzemeler üretmişlerdir. Farklı alaşım ve takviye elemanları ile değişik üretim parametrelerini (emdirme basıncı, elyaf içeriği, ergimiş metal sıcaklığı, kalıp ön ısıtma sıcaklığı ve katılaşma hızı gibi) kullanarak MMK üretim sistemini test etmişlerdir. Al_2O_3 elyafları önceden hazırlanmış kalıp içerisindeki form üzerine, 1-3 MPa arasında gaz basıncı uygulayarak, Al-4wt.% Cu-1wt.% Mg-0,5wt.% Ag içerikli alüminyum alaşımını emdirerek kompozit numuneler elde etmişlerdir. Yapmış oldukları mikroyapı ve mekanik özellik testleri sonucunda, Al-4wt.% Cu-1wt.% Mg-0,5wt.% Ag/ Al_2O_3 elyaf takviyeli MMK malzeme için optimum üretim şartlarının; 750 °C ergime ve kalıp içi form sıcaklığı ile en fazla 3 MPa basınç olduğunu belirtmişlerdir. Yapmış oldukları ön hazırlık üretimleri sonucunda gaz basıncı ile emdirme yönteminin uzun elyaf ve hybrid takviyeli metal matrisli kompozitlerin üretiminde kullanılabilecek başarılı bir yöntem olduğunu vurgulamışlardır [21].

Eroğlu ve Baykara (2000), tungsten (W) tozu esaslı ağır alaşımların üretilmesinde toz karıştırma tekniğinin etkilerini araştırmışlardır. Bu amaçla, tungsten (10,5 ve 3,4 μm), nikel (3 μm) ve demir (4,5 μm) tozlarından bir alaşım malzemesi üretmişlerdir. Tozlardan, ağırlık oranı 92,5W-5,25Ni-2,25Fe ve 90W-7Ni-3Fe olacak şekilde iki tür karışım hazırlamış ve bunları turbula karıştırıcı ile mekanik alaşımlama cihazında iki farklı karıştırma işlemine tabi tutmuşlar. Karışım tozlarına, turbula karıştırıcıda 85 rev/min'de 3 saat süre ile karıştırırken, mekanik alaşımlama cihazında 1/10 oranında bilya kullanılarak 400 rev/min'de 3 saat süre ile mekanik karıştırma işlemi

uygulamışlardır. Karışım tozlarının lazer parçacık boyut analiz cihazıyla analizi sonrasında; iri taneli W içeren karışım tozlarının, turbuladan elde edilen boyutu ortalama 12,3 μm , mekanik alaşımlamadakilerin ise 7,5 μm olduğu tespit edilmiştir. Küçük taneli W içeren karışım tozları için ise boyutun turbuladan elde edilende 5,7 μm , mekanik alaşımla sonrasında 3,6 μm olduğu görülmüştür. Buradan, toz karıştırma tekniği ve tungsten toz boyutunun, kullanılan bu ağır alaşımların özelliklerini büyük oranda etkilediği bulunmuştur. Araştırmacılar, mekanik özellikleri araştırmak amacıyla karışım tozları, 23x100 mm boyutlarındaki kalıp içerisinde 230 MPa basınçta soğuk sıkıştırmışlar ve preslenen tozlara hidrojen atmosferinde 1480 °C’de 0,5 saat süreyle sinterleme işlemi uygulamışlar. Yoğunluk ölçümleri sonucunda malzemenin %99,6 yoğunlukta olduğunu tespit etmişlerdir. Ortalama tane boyutu 10,5 ve 3,4 μm olan W tozu için, mekanik alaşımlama sonucu elde edilen numunelerin çekme özellikleri, turbula karıştırıcıda elde edilen numunelere göre daha iyi sonuçlar vermiştir. Tane iyileşmesi karşılaştırıldığında, genellikle turbula karıştırıcıyla elde edilen numunelerde yüksek süneklikliğe bağlı olarak irileşmiş tungsten taneleri meydana gelmiştir. Ancak, elde edilen bu numunelerin en düşük çekme özelliğine sahip olduğu tespit edilmiştir. Metalografik analizler sonucunda, bu alaşımların tungsten tanelerinin birbirine yakınlık derecesinin çokluğuna bağlı olarak daha kırılgan bir yapı oluştuğunu bulmuşlardır [22].

Davidson ve Regener (2000), çalışmalarında MMK’ların üretimi için toz metalurjisi yöntemini kullanmışlardır. Matris malzemesi olarak AA-6061 alaşımı (45 μm) ve takviye elemanı olarak farklı ebatlarda kaplamasız ve bakır kaplı SiC parçacıkları (23 μm ve 7 μm) kullanmışlardır. Çalışmalarında, kaplamalı ve kaplamasız SiC_p takviyeli, alüminyum esaslı MMK’ların mikroyapı ve mekanik özelliklerini kıyaslamışlardır. Kaplamalı SiC_p elde etmek için akımsız biriktirme ile kaplama yöntemini kullanmışlardır. MMK malzeme üretiminde işlem basamakları; SiC_p kaplama işleminin gerçekleştirilmesi, alüminyum alaşımlarının ağırlık oranının tespiti, kaplamasız ve kaplamalı SiC parçacıkların ağırlıkça yüzde oranına göre ağırlıklarının hesaplanması, takviye elemanlarının ağırlıkça %10 oranında matris fazı içerisine

mekanik olarak karıştırılması, karışımın çift taraflı kalıp içerisine koyulması, kalıbın 385 MPa basınçta 5 dakika preslenmesi ve basınçsız olarak kalıp içerisinde 610 °C’de 5 saat boyunca sinterlenmesi, 530 °C’de 1 saat bekletme, hızlı olarak soğutma işlemi ve ürünün 8 saat boyunca 178 °C’de yaşlandırma işlemine tabi tutulması şeklinde özetlenebilir. Üretmiş oldukları kompozit malzemelerin mikroyapı incelemelerini, geri saçılma (backscatter) tekniği ile görüntü almayı sağlayan taramalı elektron mikroskobu ile gerçekleştirmişlerdir. Mikroyapı incelemeleri sonucunda, basınçsız bir üretim tekniği kullanmaları nedeniyle, numunelerde % 2 oranında gözenek oluştuğunu belirtmişlerdir. Matris malzemesinin kimyasal içeriğini belirlemek için kimyasal yapı analizi uygulamışlar ve alaşımın Al, Si, Fe, Cr’dan oluştuğunu tespit etmişlerdir.

Yapmış oldukları SEM incelemeleri ve mekanik testler sonucunda bakır kaplamanın, matris ile takviye elemanı arasındaki ara yüzey bağını güçlendirdiğini ve yük iletiminin kaplama ile daha iyi olduğunu, parçacıkların darbe dayanımının yükseldiğini tespit etmişlerdir. Parçacık boyutu 23 µm olan kaplamalı ve kaplamasız SiC_p takviyeli kompozitleri birbiriyle kıyaslandıklarında; bakır kaplı SiC_p takviyeli kompozitlerin daha iyi performans sergilediğini belirtmişlerdir. Ayrıca, 7 µm boyutlarındaki kaplamasız SiC_p takviyeli kompozitin çekme dayanımının daha iyi olduğunu tespit etmişlerdir. Bu üretim yöntemi ile kompozit malzemelerin düşük maliyette ve kolay bir şekilde üretilebileceğini vurgulamışlardır [23].

Peng ve ark. (2002), alüminyum matrisli kompozit malzemelerin üretiminde, mekanik özellikleri geliştirici, modifiye edilmiş kısa elyaf takviyeli platform kullanan basınçlı emdirme yöntemini kullanmışlardır. Elyafların düzenlenmesinde rasgele yönlendirilmiş Al₂O₃ elyaf demetlerini, sinterleme, fosforik asit ile ısıtma, fosforik asit ve alüminyum hidroksitle ısıtma ön işlemleri sonrasında, Al tozlarını kalıp içerisindeki forma emdirerek sinterlemişlerdir. Kompozit malzemeler üzerinde yapmış oldukları incelemeler, fosforik asit çözeltisinin kullanılmasıyla platform içerisindeki elyafler üzerine kendiliğinden bir etkileşim bağı oluşturduğunu ve bu yüzden kompozitin dayanımının kötü yönde etkilendiğini göstermiştir. Bunun esas nedeni olarak, kullanılan karışımın elyaflar üzerinde kimyasal reaksiyona girmesini

ve bunun sonucunda elyafların zarar görmesini göstermişlerdir. Bu oluşumun gerçekleşmemesi için fosforik asit ve alüminyum hidroksitle ısıtma işlemiyle çapraz bağ oluşturmuşlardır. Bu sayede laboratuvar şartlarında üretmiş oldukları bu kompozitlerde süneklik ve elastikiyet modülü göz ardı edildiğinde, yüksek çekme dayanımlı elyaf takviyeli kompozit ürettiklerini belirtmişlerdir [24].

Li ve ark. (2003), NiO ve Al_2O_3 tozlarının karışımından, hacimce %4 oranında Al_2O_3 parçacık takviyeli kompozitleri hidrojen indirgemesi ve sıcak presleme yaparak, bilyalı karıştırma ve kaplama yönteminden oluşan iki farklı yolla üretmişlerdir. Üretmiş oldukları kompozitlerin mikroyapı özelliklerini, toz karışımların sinterleme davranışlarını ve kompozitlerin mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Kompozitleri, toz halindeki karışımı teorik olarak %98 hacim yoğunluğuna ulaşıncaya kadar bilyalı karıştırma sonrasında $1450\text{ }^{\circ}C$ 'de ve yine $1400\text{ }^{\circ}C$ 'de hidrojen indirgeyici atmosfer altında kaplama yöntemini kullanarak ve sıkıştırarak üretmişlerdir. Yapmış oldukları mikroyapı incelemelerinden, parçacık dağılımının homojen olduğunu gözlemlemişlerdir. Kullanmış oldukları iki üretim yöntemini kıyasladıklarında, bilyalı karıştırma sonrasında sıcak presleme yöntemi ile elde edilen kompozitlerin diğerine göre tokluklarının yüksek, fakat dayanımlarının düşük olduğunu tespit etmişlerdir. Bu kompozitlerdeki tokluğun iyileşmesine neden olarak çatlak ilerlemesinin takviye fazı tarafından durdurulması ve çatlağın dallanması olduğunu belirtmişlerdir. Dayanımın değişimini mikroyapı incelemelerinden ve kompozitlerin kırılma modeli sonuçlarından yorumlamışlardır. Deneyler sonucunda kaplama metodu ile ürettikleri kompozitlerde elde ettikleri dayanım ve tokluk değerlerinin standart sapmalarının değerlendirmesi sonucunda gerçeğe yakın ve uygun değerlerin tespit edilebildiğini belirtmişlerdir [25].

Tham ve ark. (2001), Al/SiC_p kompozitlerin, matris-takviye fazı ara yüzey reaksiyonlarının dayanım özellikleri üzerine etkilerini farklı bir yaklaşımla araştırmışlardır. Kompozitlerin üretimleri esnasında, matris ve takviye fazı arasındaki temas süresi bakımından farklı ara yüzey mikroyapısına sahip, iki tipte kompozit malzeme üretmişlerdir. Takviye ve matris ara yüzeyinde ince bir Al_4C_3 reaksiyon katmanının oluşması ile kompozitin akma ve çekme dayanımının, çalışma

sertleşmesi hızının ve çalışma dayanımının arttığını ve kırılma modeli bakımından arayüzey katmanının değişime uğramadan parçacık kırılması şeklinde oluştuğunu vurgulamışlardır. Kompozitte gözlenen bu iyi gelişmeleri arayüzey bağının iyi olmasına bağlamışlardır. Arayüzey katmanının Al_4C_3 şeklinde kendiliğinden oluşma eğiliminde olduğunu ve matris ile SiC_p arasında mekanik bir kilitleme yaptığını belirtmişlerdir. Kompozitlerde arayüzey bağının güçlü olması ile plastik deformasyon katsayının arttığını ve bununda çalışma setleşmesine ve matris fazının tane yapısına etkide bulunarak yapı hatalarının oluşmasının kolaylaştığını, bununla birlikte de kompozitin sünekliğinin azaldığını bildirmişlerdir [26].

Han ve ark. (2002), denge halinde TiB_2 parçacıklarla takviyeli ötektik Al-Si alaşım matrisli kompozitlerin üretiminde ergimiş metal reaksiyon oluşturma yöntemini kullanmışlardır. Kullandıkları bu yöntemde, 1 dakika içerisinde $1\ \mu m$ 'den daha küçük TiB_2 partiküllerinin homojen olarak ötektik yapı içerisinde dağıldığını gözlemişlerdir. α -Al içerisinde TiB_2 partikül oluşumunun oldukça az olmasına karşın ötektik Si içerisinde daha iyi olduğunu görmüşlerdir. Al-Si alaşımı içerisinde yer alan denge halindeki TiB_2 partiküllerinin, alaşımın çekme dayanımını artırdığını tespit etmişlerdir. Dayanımın, TiB_2 partikül miktarının artmasıyla doğru orantılı olarak arttığını belirtmişlerdir. Maksimum çekme dayanımının döküm kompozitte (% 6 TiB_2 /Al-Si-Mg) oda sıcaklığında %14,7'lik artışla, 296 MPa olarak bulmuşlardır. Aynı zamanda yüzde uzamada da %5,5 iyileşme olduğunu tespit etmişlerdir. T6 ısıl işlemi uygulanmasından sonra, kompozitin maksimum çekme dayanımının 394 MPa çıktığını belirtmişlerdir. Mikroyapı incelemeleri ile kompozit içerisinde yer alan TiB_2 partiküllerin $1\ \mu m$ 'den daha küçük şekilde oluşarak Al-Si faz içerisinde dağıldığını ve ötektik Si ile bağlantılı olarak yerleştiğini gözlemişlerdir. Soğuma esnasında TiB_2 partiküllerinin yapı içerisindeki fazların oluşumunu etkilediğini belirtmişlerdir. Kompozit numunelere uygulanan ısıl işlemin malzemenin morfolojisini değiştirerek dayanım özelliklerinin iyileştirdiğini belirtmişlerdir [27].

Sur (2008), AA-6082 alaşım matrisli Al_2O_3 (ortalama $42\ \mu m$) ve Ni(K)Gr (ortalama $127\ \mu m$) parçacıklarla takviyeli kompozit malzemeleri ergimiş metal karıştırma-

basıncılı döküm yöntemini kullanarak üretmiştir. Kompozit malzemeleri; hacimce %8 Al_2O_3 ve %8 Ni(K)Gr olarak tek takviyeli ve hacimce %4 Al_2O_3 + Ni(K)Gr karma takviyeli olarak üreterek mekanik ve işlenebilirlik özelliklerini incelemiştir. Kompozit malzemelerin üretimini; matris malzemesinin pota içinde 640 °C’de ergitilmesi, takviye elemanlarının pota içerisine 4-6 gr folyo içerisine koyarak ilavesi, döküm kalıbını 500 °C ön ısıtma uygulanması, döküm pota sıcaklığını 700 °C’ye çıkartılması ve ergiyiğin kalıba dökülmesi, kalıba 93 MPa basınç uygulanması şeklinde gerçekleştirmiştir. Mikroyapı incelemeleri sonucunda parçacık dağılımının tüm kompozitlerde nispeten homojen olduğunu ve ana faz-takviye elemanı arayüzey bağının oluştuğunu belirtmiştir. En yüksek sertlik değerini %8 Al_2O_3 takviyeli kompozit numunede 105 BHN olarak ölçmüştür. Yoğunluk ölçümleri sonucunda Al_2O_3 parçacık yüzde hacim oranının artmasıyla MMK numunelerin yoğunluğunun arttığını tespit etmiştir. Ürettiği malzemelerin hepsinde gözeneklilik meydana gelmiş olup en fazla gözenek miktarını %0,96 olarak %8 Ni(K)Gr numunede ölçmüştür. Gözenekliliğin nedeni olarak ergimiş haldeki karışımın hava ile temas etmesi ve döküm süresini göstermiş olup karma takviyeli kompozitte en düşük gözenekliliğe ulaşıldığını tespit etmiştir [28].

Abd El-Azim ve ark. (2002), AlSi18CuNi esaslı MMK malzemeleri ergimiş metal karıştırma yöntemi ile ağırlıkça %2, 4, 6, 12 oranlarında kısa Al_2O_3 elyaflarla takviye ederek üretmişlerdir. Kompozit malzemelerin üretimlerinde, ıslanabilirliği iyileştirmek için 800 °C’de Al_2O_3 elyafları tavlamışlar ve matrise ağırlıkça %0,98 oranında Mg ilavesi yapmışlar ve üretimde azot gazını (N_2) koruyucu atmosfer olarak kullanmışlardır. Bunların yanında, matrisi ergime işleminden önce alkalın bazlı ve değişik asitlerden oluşan bir karışımla yıkama işlemine tabi tutmuşlardır. Bu işlemde, ergimiş alüminyum yüzeyinde oluşabilecek oksit tabakasının incelmesini ve yüzey kirliliğini azaltmayı amaçlamışlardır. Üretmiş oldukları kompozitler üzerinde bir dizi mekanik ve metalurjik incelemeler gerçekleştirmişlerdir. Mikroyapı incelemelerinden, kompozit yapıyı oluşturan matris fazının mikroyapısının, Al_2O_3 elyaflar nedeniyle, tane büyüklüğünün incelmesini ve Al_2O_3 elyafların dağılımının homojenlik gösterdiğini gözlemlemişlerdir. MMK numunelerin çekme dayanımlarını belirlemek amacıyla, DIN 50125/B’ye göre çekme numuneleri hazırlamışlar ve

deneyleri oda sıcaklığında gerçekleştirmişlerdir. MMK'lerin aşınma davranışlarını ise kuru ortamda silindir üzerine baskı (*pin-on-ring*) yöntemini kullanarak incelemişlerdir. Kompozitlerin mekanik özelliklerinin ve aşınma davranışlarının takviye fazının ilavesi ile matrise göre iyileşme gösterdiğini tespit etmişlerdir. Aynı zamanda kompozitlerin çekme dayanımlarının ve sertliklerinin matris malzemesine göre yüksek olduğunu görmüşlerdir. Aşınma deneyleri sonucunda, kompozitlerin takviye oranının artmasıyla aşınma dayanımlarının iyileştiğini bildirmişlerdir [29].

Tekmen ve ark. (2003), Al-Si matris alaşımına hacimce %10 ve %20 SiC_p takviyeli MMK malzemeleri basınçlı döküm ve sonrasında ekstrüzyon (compocasting) işlemine tabi tutarak üretmişlerdir. Üretim işlemi argon atmosferinde yapılmış olup, SiC_p'lar 900 °C'de oksit giderme işlemine tabi tutulduktan sonra 600 °C'de yarı-katı haldeki matris fazı içerisine eklenmiştir. Daha sonra karışım, 750 °C'ye hızla ısıtılarak, 150 °C'deki ön ısıtılmış kalıp içerisinde preslenmiştir. Kompozit numunelerin son hali sıcak ekstrüzyon işlemiyle oluşturulmuştur. MMK malzeme içerisinde oluşan gözenek miktarının mekanik özelliklere etkilerini araştırmışlardır. Deneyler sonucunda sıcak ekstrüzyon işleminin matris tane boyutu ve gözenekliliği dikkate değer miktarda azalttığını tespit etmişlerdir. Yapı içerisindeki gözenek miktarının azalmasıyla, malzemelerin kırılma ve çekme dayanımının arttığını belirtmişlerdir [30].

Moustafa ve ark. (2002), akımsız kaplama yöntemi ile Ni kaplanmış SiC ve Al₂O₃ parçacıklar ve bu parçacıkları kaplanmamış halde Cu matris içerisine TM yöntemi ile ilave ederek MMK malzemeler üretmişlerdir. Kaplamalı ve kaplamasız parçacıkların her birinden ağırlıkça %20 değerinde bakır tozlarına ilave ederek, 360 rev/min karıştırma hızında 10 dakika süresince mekanik alaşımlama yapmışlardır. Daha sonra karışım tozları 600 MPa basınçta soğuk presleyip, 900 °C'de hidrojen atmosferinde sinterlemişlerdir. İncelemeler sonucunda, kaplamasız parçacıklarla takviyeli kompozitlere kıyasla Ni kaplanmış parçacıklarla takviyeli kompozitlerin mutlak yoğunluğunun daha yüksek ve gözenek miktarlarının da az olduğunu tespit etmişlerdir. Bunun nedeni olarak Cu matris ile Ni kaplı parçacıklar arasındaki

yapışma eğiliminin yüksek olmasını göstermişlerdir. Ayrıca bu kaplama uygulamasının MMK'lerin çekme ve basma dayanımlarını artırdığını tespit etmişlerdir [31].

Fogagnolo ve ark. (2004), bir kompozit malzemenin üstün özelliklerde olması için takviye fazının homojen dağılımının önemli bir koşul olduğunu belirtmişlerdir. Toz metalurjisi (TM) ile tipik döküm işleminde oluşan tortulanma olmadan, geniş bir yelpazede metal matris kompozitler üretilebilir. Özellikle, parçacık dağılımı homojenliğinin artırılmasında, matris ve takviye parçacıkları karıştırmak için mekanik alaşımlama (MA) kullanılmaktadır. Yaptıkları çalışmada 6061 Al alaşımlarının ZrB_2 parçacıklarla takviyeli tozlardan geleneksel TM ve sıcak ekstrüzyon yoluyla üretilen kompozitler ile yine aynı toz karışımının mekanik alaşımlanmasından sonra soğuk presleme ve sıcak ekstrüzyon yoluyla üretilen kompozitlerin karşılaştırılmasını sunmaktadır. Araştırmacılar, MA ile parçacık dağılımı homojen olan kompozit tozların üretilip, bu tozlara ekstrüzyon işlemi uygulanarak tam yoğunlukta kompozit malzemelerin üretilebileceğini vurgulamışlardır. Geleneksel TM yöntemiyle malzeme üretimi sonucunda, ZrB_2 parçacıkların birleşime katılmasıyla malzeme sertliğinde küçük bir artış olurken çekme dayanımında küçük bir azalma olmuştur. MA topaklanan takviye parçacıklarını kırar, parçacıkların yüzeyinde oluşan yırtılmaların çoğunu yok eder, dağılımı iyileştirir ve parçacık boyutunu düşürür. Bunlar, metalurjik açıdan kompozit yapının pekiştirilmesini gerçekleştirerek çekme dayanımı ve sertlikte yaklaşık olarak %100 iyileşme sağlamaktadır. Sonuç olarak, düşük enerjili karıştırma ile elde edilen kompozitlerde, ZrB_2 parçacıkların eklenmesiyle malzeme sertliğinde küçük bir artış sağlarken, çekme dayanımında küçük bir azalmaya neden olduğunu bulmuşlardır [32].

2.2. MMK'ların İşlenebilirlikleri ile İlgili Yapılan Çalışmalar

Metal matrisli kompozitlerin mekanik ve yüksek sıcaklık özelliklerinin mükemmel olmasına rağmen işlenebilirliklerinin kötü olması diğer metal malzemelerin yerlerine kullanımlarını azaltmaktadır [33]. Diğer yandan bu kompozitlerin aşınma direnci; tek fazlı alaşımlar ile karşılaştırıldığında, sünek alüminyum matrisin içerisine katılan aşındırıcı seramik parçacıkların ikinci bir faz oluşturmasına bağlı olarak artmaktadır. Bu nedenle, kompozit malzemelerin etkili işlenmesi ve ölçü tamlığıyla ilişkili zorluklar imalat açısından önemli bir problem olmaktadır [34]. Kompozitlerin işlenmeleri esnasında kullanılan kesici takımların, çok kısa zamanda aşınması işleme maliyetinin artmasına neden olmaktadır [33]. Kompozit malzemelerin bu kötü özelliklerinin, işleme maliyeti yönünden etkilerinin azaltılması amacıyla, optimum kesici takım malzemesi ve geometrisi ile kesme parametrelerinin seçiminin yapılması gerekmektedir. Bu bağlamda kompozit malzemelerin işlenebilirlik özelliklerinin belirlenmesi yönünde yapılan araştırmalardan bazıları aşağıda özetlenmiştir.

Manna ve Bhattacharayya (2003), SiC_p takviyeli alüminyum esaslı kompozitin torna tezgahında işlenmesi sırasında oluşan kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülüğünü araştırmışlardır. Araştırmacılar, LM6Mg alüminyum alaşımı esaslı %15 SiC_p takviyeli kompozit malzemenin işlenmesinde kaplamasız sementit karbür (WC) kesici takımlar kullanmışlardır. Kesme deneylerini farklı kesme hızı (20-225 m/min), ilerleme miktarı (0,14-1 mm/rev) ve kesme derinliği (0,25-1,5 mm) kullanarak yapmışlar ve kesme sırasında oluşan kesme kuvvetleri, yüzey pürüzlülüğü ve yığıntı talaş oluşumunu incelemişlerdir. Sonuç olarak esas kesme kuvvetlerinin ilerleme kuvvetinden daha büyük olduğu ve aynı işleme şartlarında ilerleme kuvvetinin kesme hızına bağlı olarak çok fazla değişmediği, esas kesme kuvvetinin ise kesme hızına bağlı olarak azaldığını bulmuşlardır. Ayrıca, Al/ SiC_p -MMK malzemenin işlenmesi boyunca oluşan BUE ve yüksek kesme kuvvetleri nedeniyle düşük kesme hızında en yüksek yanak aşınması meydana geldiğini tespit etmişlerdir. Düşük kesme hızlarında oluşan BUE'nin gerçek talaş açısını büyüttüğü ve bunun kesme kuvvetlerini etkilediği tespit edilmiştir. Yan yüzey aşınmasının kesme hızına göre ilerlemeye daha az duyarlı olduğu gözlenmiştir. MMK malzemenin işlenmesinde, WC takım için 60

ila 150 m/min kesme hızı arasındaki değerler tavsiye edilmiş olup, en iyi yüzey kalitesi için yüksek kesme hızı, düşük ilerleme ve düşük kesme derinliği seçilerek kesme işleminin yapılması tavsiye edilmiştir [35].

Krishnamurthy ve ark. (2007), SiC_p ve grafit takviyeli alüminyum esaslı kompozitlerin tornalanması sırasında oluşan bileşke kuvvetinin işleme şartlarına göre değişimini incelemişlerdir. Tornalama işlemlerinde kaplamasız sementit karbür (WC-K10) takım ve kesme kuvvetlerinin ölçülebilmesi için gerinim ölçekli dinamometre kullanmışlardır. Sonuç olarak, Al/ SiC_p ve Al/grafit metal esaslı kompozitlerin her ikisi için de bileşke kesme kuvvetinin değişimine en fazla etkileyen değişkenin kesme derinliği, ikinci olarak etkileyen değişkenin parçacık takviye oranı olduğunu tespit etmişlerdir. SiC_p takviyeli alüminyum esaslı kompozitte takviye oranının artması ile bileşke kesme kuvvetinin arttığı, grafit takviyeli alüminyum esaslı kompozitte takviye oranının artması ile bileşke kesme kuvvetinin azaldığı görülmüştür. Benzer şekilde kesme hızı ve ilerlemenin artmasıyla, bileşke kuvvetin Al/ SiC_p kompozitte arttığı, Al/grafit kompozitte ise azaldığı tespit edilmiştir [36].

Pedersen ve Ramulu (2006), %20 oranında ortalama 3-4 μm boyutunda SiC_p takviyeli Mg esaslı kompozitin TiCN/TiN kaplamalı WC uçlar ile farklı kesme şartlarında tornalanması sırasında oluşan takım aşınmasını, kesme kuvvetlerini ve yüzey pürüzlüğünü incelemişlerdir. Kesme parametreleri olarak 73,1 ve 122 m/min kesme hızı, 0,112 ve 0,203 mm/rev ilerleme ve 0,254 ve 0,762 mm kesme derinliği kullanmışlardır. Deneysel çalışmanın sonuçlarına göre; kesme hızının ve kesme kenarı açısının kesme kuvvetlerine belirgin bir etkisi olmadığı, kesme kuvvetinin ilerleme miktarı ve kesme derinliğinin artması ile arttığı görülmüştür. Ayrıca kesme hızı, kesme derinliği ve kesici kenar açısının yüzey pürüzlülüğüne çok az miktarda etkisi olduğu, asıl etkili değişkenin ilerleme miktarı olduğunu tespit etmişlerdir. Yüzey pürüzlülük değerlerinin teorik değerler ile benzer eğilimde olduğunu vurgulamışlardır. Kompozitlerin frezelenmesi süresince oluşan talaş biçimlerinin; testere dişi şeklinde kenarı olan sürekli veya süreksiz talaşlar şeklinde olduğunu görmüşlerdir. Ayrıca, kesici takımların yan yüzeylerinde meydana gelen aşınmanın nedeni olarak, abrasiv aşınma mekanizması gösterilmiştir [37].

Özben ve ark. (2008), hacimce %5, 10 ve 15 oranında SiC_p takviyeli AlSi7Mg2 alüminyum esaslı kompozitin mekanik özellikleri ve işlenebilirliği üzerinde bir araştırma gerçekleştirmişlerdir. İşleme deneylerini, farklı seviyelerde kesme hızı, ilerleme ve kesme derinliğinde TiN kaplamalı WC-K10 takım ile kuru şartlarda yapmışlardır. Parçacık ilavesindeki artışla beraber darbe tokluğu ve sertlikte artma gözlenmiş, ancak çekme dayanımı %10 takviye oranına kadar artarken %15 oranında azalma eğilimi sergilemiştir. Kesme deneyleri sonucunda, yüzey pürüzlülüğünün ilerleme ve parçacık takviye oranının artması ile arttığını tespit etmişlerdir [38].

Kılıçkap ve ark. (2005), MMK malzemelerin içerisindeki SiC_p gibi takviye elemanlarının doğasında olan aşındırma ve sertlik özellikleri nedeniyle, işlenmesi zor malzemeler olarak bilindiğini ve bu nedenle MMK malzemeler üzerine yoğun araştırmaların yapıldığını rapor etmişlerdir. Bu amaçla, 24 µm boyutunda %5 SiC_p takviyeli alüminyum esaslı MMK malzemeyi, yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınmasını değerlendirmeyi içeren deneysel araştırmaları için kullanmışlardır. İşlenebilirlik deneylerini, WC-K10 kesici takım (kaplamasız ve TiN kaplamalı), farklı kesme hızı (50, 100 ve 150 m/min), farklı ilerleme miktarı (0,1, 0,2 ve 0,3 mm/rev) ve farklı kesme derinliği (0,5, 1 ve 1,5 mm) kullanarak tornalanması olarak yapmışlardır. Kuru kesme şartlarında yapılan deneylerde, kesici kenarda yapışma görülmemiştir. Takım aşınması kesici takımın yan yüzeyinde meydana gelmiş olup aşınma mekanizmasını abrasiv aşınma mekanizması olarak tespit etmişlerdir. Kesme hızı, takım aşınması üzerinde en etkin parametre olup, kesme hızının 50 m/min'den 150 m/min'e çıkmasıyla aşınmanın iki katına çıktığını belirtmişlerdir. Yüzey pürüzlülüğü üzerinde en etkili parametrenin ilerleme olduğunu ve yüksek ilerleme değerlerinde en kötü yüzey kalitesinin oluştuğunu tespit etmişlerdir. TiN kaplamalı kesici takımla en düşük aşınma elde ederken, aynı zamanda en iyi yüzey kalitesinin de bu takımla işleme sonrasında meydana geldiğini gözlemlemişlerdir [39].

Lin ve ark. (2003), %20 hacim oranında ortalama 12,8 µm boyutunda SiC_p takviyeli A359 alüminyum esaslı kompozitin çok kristalli elmas (ÇKE) kesici takımlarla tornalanması sırasında oluşan kesme kuvvetleri ve takım aşınmasını incelemişlerdir.

Kesme deneylerinde, kesme parametresi olarak 300-700 m/min kesme hızı, 0,1-0,4 mm/rev ilerleme ve 0,5 mm sabit kesme derinliği kullanmışlardır. Kesme hızı ve ilerlemenin artması ile hem kesme kuvvetinin hem de takım aşınmasının arttığını tespit etmişlerdir. İlerleme ve kesme kuvveti deneysel sonuçlarını kullanarak takım aşınması için genel eşitlikler elde etmişlerdir. Asıl kesme kuvvetindeki dalgalanmaların ilerleme kuvvetinden daha fazla olduğunu ve bunun nedeni olarak kesme hızındaki değişimleri göstermişlerdir. Buna göre; bütün kesme şartları için kesme kuvvetinden elde edilen eşitliğe göre ilerleme kuvveti temel eşitliğinin doğruluğunun daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir. Özellikle kesme kuvvetlerinin doğrusal olmayan ilişkiler sergilediği yerlerde, sinir ağları ile takım aşınması tahmininin doğruluğunun geliştirilebileceğini vurgulamışlardır. Deneysel veriler üzerinde yaptıkları çoklu regresyon analizi sonuçları ile genelleştirilmiş temel eşitlik tahminlerinin çok benzer olduğunu tespit etmişlerdir. Buna bağlı olarak regresyon analizinin sinir ağları metodunun doğrusal etkinleştirme fonksiyonu olarak kullanılan özel bir durumu olduğunu belirtmişlerdir [40].

Reddy ve ark. (2008), ağırlıkça %20 SiC_p takviyeli 2024 alüminyum esaslı kompozitlerin işlenmesinde çevresel frezeleme metodunu kullanmışlardır. Bu amaçla, iş parçası olarak SiC_p takviyeli ve takviyesiz 2024 alüminyum alaşımının TiAlN kaplı karbür kesici takım ile işlenmesinde farklı kesme parametrelerinin yüzey kalitesi ve işlemeden sonra oluşan alt yüzey hasarına etkilerini incelenmişlerdir. Bütün kesme şartlarında, Al-SiC_p kompozit malzemenin işlenmesi sonucunda elde edilen yüzey pürüzlülük değerlerinin Al alaşımının işlenmesi sonucu elde edilen değerlerden daha küçük olduğunu ve ilerleme miktarının artmasıyla yüzey pürüzlülüğünün arttığını tespit etmişlerdir. Ayrıca, ilerlemenin sabit tutularak kesme hızının artırılması durumunda yüzey pürüzlülüğünün azaldığını belirtmişlerdir [41].

Ding ve ark. (2005), 12,8 µm boyutunda %20 SiC_p takviyeli Al-Si alaşımından üretilen MMK işparçası üzerinde KBN ve ÇKE takımlar kullanarak 50 m/min'den 400 m/min'e değişen kesme hızlarında işlenebilirlik deneyleri yapmışlardır. Deneylerde kullandıkları kesici takım 0,8 mm uç yarıçapında olup, deneyleri 0,3 mm

kesme derinliği, 0,1 mm/rev ilerleme miktarında kuru ve ıslak şartlarda yapmışlardır. Kesici takımlarda yoğun olarak yan yüzey aşınmasının olduğunu, bunun sebebinin de yüzeydeki kırılmalardan kaynaklandığını tespit etmişlerdir. Kesme işlemi boyunca takımın talaş yüzeyi taneler arası kırılmalara maruz kalmıştır. KBN takımlar, ÇKE takımlara göre, daha yüksek kırılma direnci sergilerken, en yüksek aşınma direnci ÇKE takımlarda (işparçasının yapışma eğiliminin azalması) görülmüştür. Kuru kesme şartlarında, yüzey kalitesinde en etkin parametre, işparçası malzemesinin kesici takıma yapışması olarak belirlenmiştir. Soğutma uygulamasının takım aşınmasında herhangi bir etkisi görülmezken, yüzey kalitesini iyileştirdiği gözlenmiştir. Düşük kesme hızlarında soğutma yapılmasına rağmen, yapışmada bir azalma olmamış, öte yandan işlenmiş yüzey ve kesici yan yüzeyi arasında aşınmayı artırdığı düşünülmüştür. Bu durumun çentik aşınmasını tetikleyerek işlenmiş yüzeyde dalgalanmaya sebep olduğunu belirtmişlerdir [42].

Zhu ve Kishawy (2005), kaplamalı tungsten karbür (WC) takım kullanarak 6061 Al alaşımı matrisli Al_2O_3 takviyeli kompozitin işlenmesinin simülasyonu için bir sonlu eleman modeli geliştirmişlerdir. Al alaşımı matris ve alümina parçacıklar arasındaki kırılma modeli ile sonlu elemanlar modelini birleştirerek, alümina parçacıklar üzerindeki kayma gerilmeleri ve bunların etkilerini araştırmak için kullanmışlardır. 85 m/min kesme hızı, farklı ilerlemeler (0,1, 0,2 ve 0,3 mm/rev) ve 3 mm kesme derinliğinde yapılan deneysel çalışma sonuçları ile modelde elde edilen kesme kuvvetleri sonuçlarını karşılaştırmışlardır. Alümina parçacıkların arayüzey kırılmaları ve temas gerilme dağılımları ile normal ve kayma gerilmeleri ve kesme sıcaklıkları incelendiğinde, takım-talaş arayüzeyi boyunca maksimum 398 °C sıcaklık tespit edilmiştir. Analizde kullanılan bütün deneysel sonuçlar için ilerlemenin artmasıyla tahmini kesme kuvveti bileşenlerinin arttığı, tahmini ve ölçülmüş değerler arasında %9 hata bulunduğu belirlenmiştir. Alümina parçacıklar üzerindeki Von Mises eşdeğer gerilme dağılımı sonuçları, birinci kayma bölgesindeki parçacıklar üzerindeki gerilmelerin aşamalı olarak arttığını göstermiştir. Alümina parçacıklar üzerindeki kayma gerilmesi dağılımı, birinci kayma bölgesinde negatif yönde olurken ikinci kayma bölgesinde pozitif yönde ortaya çıkmıştır. Takım-talaş arayüzeyi boyunca normal ve kayma temas gerilme değerlerindeki bazı

dalgalanmalar, alümina parçacıklar-takım şartlarının değişimiyle ilişkilendirilmiştir. Alümina parçacıkların arayüzeydeki kırılmalar nedeniyle matristen ayrılarak takım-talaş yüzeyinde çiziklere ve aşırı takım aşınmasına sebep olmuştur [43].

Kannan ve Kishawy (2006), çalışmalarında işlenmiş yüzey altındaki Al matristeki mikrosertlik değişimleri üzerinde kesme parametreleri ve parçacık özelliklerinin etkisini araştırmışlardır. Bu amaçla, farklı hacim oranlarında ve değişik boyutlarda Al_2O_3 parçacıklarla takviyeli MMK malzemeler üzerinde 24, 60 ve 100 m/min kesme hızı, 0,1 ve 0,3 mm/rev ilerleme ve 3 mm kesme derinliğinde dik (ortogonal) kesme deneyleri yapmışlardır. Kuru ve ıslak şartlarda gerçekleştirdikleri kesme deneylerinde, kesme kuvveti ve yüzey pürüzlük değerlerini de ölçmüşlerdir. İşlenmiş yüzeylerdeki metalografik incelemeleri sonucunda Al matrisin plastik olarak deforme olduğunu, işlenmiş yüzeylerde şiddetli hasarlar ve geometrik bozukluklar oluştuğunu tespit etmişlerdir. Mikrosertlik, genellikle işlenmiş yüzeye yakın yerlerde yüksek, daha alt katmanlarda düşük ölçülmüştür. Bu oluşumu, yüzey katmanının altında matris malzemesinin düzenli olarak deformasyon sertleşmesine maruz kalmasına atfetmişlerdir. Matris malzemesinin mikrosertliğindeki değişimler 7075 MMK için 45 μm , 6061 MMK için 60 μm derinliğe kadar gözlenmiştir. Parçacıkların kırılarak matris malzemesinden sökülmesi ve arayüzeyde yapışması nedeniyle, işlenmiş yüzeyde mikro boyutlu kırılma, çukurlar, boşluklar ve kraterler gibi geometrik bozukluklar meydana gelmiştir. Kesme hızı, kesme derinliği ve takviye hacim oranının artmasıyla hasar oranı da artmıştır. Parçacık hacim oranı ve boyutunun matris malzemesinin plastik deformasyonunda son derece etkili olması nedeniyle, parçacık boyutunun büyümesi ve hacim oranının azalmasına bağlı olarak, işlenmiş yüzey altındaki mikrosertlik değerlerini artırdığını belirtmişlerdir. Islak şartlarda yapılan deneylerde, plastik deformasyon derinliğinin azalmasına karşın matris malzemesinin mikrosertliğinin arttığını tespit etmişlerdir. Islak kesmede, kopan parçacıkların hızla akmasına bağlı olarak çukur ve boşlukların oluşması nedeniyle yüzey pürüzlülüğünün kötüleştiğini vurgulamışlardır [44].

Kannan ve Kishawy (2008), A356 Al alaşımlı matrisli 12 μm boyutlu %20 SiC_p takviyeli MMK ve 7075 Al alaşımlı matrisli 15 μm boyutunda %10 Al_2O_3 takviyeli MMK malzemeler üzerinde kaplamalı sementit karbür kesiciler ile işlenebilirlik deneyleri yapmışlardır. Deneyleri üç farklı kesme hızı (60, 120, 240 m/min), 2 mm kesme derinliği ve 0,15 mm/rev ilerleme miktarında kuru ve ıslak şartlarda gerçekleştirmişlerdir. Kesme kuvvetleri ve yüzey kalitesinin araştırıldığı bu çalışmada, ayrıca metalografik incelemelerde talaş biçimi ve kesici takım aşınmalarını da incelemişlerdir. Soğutmalı kesme şartlarında, yüksek kesme hızlarında tornalama sırasında takım ömrü artmış, buna karşın yüzey kalitesi kötüleşmiştir. Yüzey kalitesinin bozulmasını, işlenmiş yüzeyden kopan parçacıkların kısmen soğutma sıvısıyla uzaklaştırılması sırasında yüzeyde çukur şeklinde delikler ve boşlukların artmasına neden olması ile açıklamışlardır. Buradan kesme sıvısı uygulamasının yararının olmadığını belirtmişlerdir. Soğutmalı kesmede, yüksek ısıl değişimin sonucu olarak kenarı testere dişine benzeyen talaşların oluştuğu görülmüştür. İşlenmiş yüzey altında Al matris üzerindeki mikrosertlik ölçümleri en yüksek değerlerin soğutmalı kesme şartlarında meydana geldiğini göstermiştir. Takım aşınmalarının genelde abrasiv aşınma mekanizması ile meydana geldiği ve abrasiv aşınmaların yalnızca takviye parçacıklarının sertliğinden daha fazla sertliğe sahip kesiciler kullanılarak azaltılabileceği vurgulanmıştır [45].

Uday ve ark. (2007), otomotiv, uzay ve eğlence alanlarında yapısal ve aşınma direncinin önemli olduğu parçalara MMK malzeme uygulanmalarında, işlenmiş kompozit malzeme yüzeylerinin kapsamlı bir analizine gerek olduğunu belirtmişlerdir. Bu analizlerin malzemenin gerilme, sıcaklık, korozyona karşı direnç kabiliyetini belirleyeceğini ve aynı zamanda malzemenin ömrü ile güvenilirliğini kontrol edeceğini bildirmişler. Bu bilgiler ışığında, Al/SiC/10p ve Al/SiC/30p kompozitler üzerinde, kesici kenarı silici ve silicisiz geometrilik KBN kesici takım kullanarak 0,05-0,2 mm/rev, 0,6-1 mm kesme derinliği ile 40-80 m/min kesme hızlarında tornalama yöntemiyle kesme deneyleri yapmışlardır. Deneyler süresince kesme kuvvetlerini ve işlemeden sonra yüzey kalitesi, mikroyapı ve kalıcı gerilmeleri ölçmüşlerdir. Sonuçta silici geometrilik kesicilerin yüzey hasarlarını azalttığı ve

kesme kuvvetlerini düşürdüğünü gözlemişlerdir. İşlenmiş yüzeylerin kalitesi, yüzey topografyası ve alt yüzey bütünlüğü olmak üzere iki ölçümle belirlenmiştir. Yüzey topografyası standartlara uygun olan yüzey pürüzlülük ölçme aleti kullanılarak ölçülebilenken, alt yüzey bütünlüğü ölçümü karmaşık bir işlemdir. Alt yüzey hasarları işlenmiş yüzeyin 60-100 mikron altında meydana gelir. Bu katman, işlenmiş yüzeye yakın yerlerde tane büyümesi ve dislokasyonların toplanması yüzünden mikrosertliğin arttığını göstermiştir. Araştırmacılar, işleme deneyleri ve metalografik incelemeler sonucunda aşağıdaki önemli bulgulara ulaşmışlardır:

a) Silici geometrili kesici takımla yapılan deneyler sonrasında kesme kuvvetlerinde %10 luk bir azalma görülmüştür. Bunun nedenini, yüksek ısı yumuşamanın sonucu olarak takım kesici kenarı ve işparçası arasındaki temas uzunluğunun artmasına bağlamışlardır.

b) Kesme kuvvetlerinin istatistiksel analizi sonucunda ilerleme miktarı en önemli değişken olarak belirlenmiştir. Ancak Al/SiC/30p kompozitin işlenmesinde kesme derinliği etkin değişken olarak bulunmuştur. Benzer olarak, ilerleme miktarı her iki kompozit malzemenin işlenmiş yüzeylerin pürüzlülüğüne etkileyen ana değişken olarak bulunmuştur.

c) İşlenmiş yüzeylerin mikroyapı analizi, ilerleme izleri, oyuklar ve kırılmaların sayısının silici geometrili kesiciyle yapılan işleme deneyleri sonrasında önemli derecede azaldığını göstermiştir. Ayrıca, oluşan kalıcı gerilmelerin işlenmemiş yüzeyde çekme, işlenmiş yüzeyde ise basma şeklinde meydana geldiğini belirtmişlerdir. Aynı kesme hızı ve ilerlemenin kullanıldığı yüksek kesme derinliğinde, silici geometrili kesicilerle yapılan işleme sonrasında yüzeylerde basma kalıcı gerilmelerinin azaldığını tespit etmişlerdir [46].

Özçatalbaş (2003), Al esaslı Al_4C_3 takviyeli kompozitleri mekanik alaşımlama (MA) yöntemini kullanarak üretmiştir. Farklı MA sürelerine göre ürettiği MMK'lerin, mikroyapı ve mekanik özelliklerini inceleyerek, kompozit malzemelerin işlenebilirliklerini değerlendirmiştir. Kesme deneylerini, 15 m/min'den 205 m/min'e değişen kesme hızı, 0,14 mm/rev ilerleme ve 1 mm kesme derinliğinde kaplamasız WC kesici takımla gerçekleştirmiştir. Mekanik alaşımlama süresinin artmasıyla Al_4C_3 takviye fazının miktarının arttığını gözlemiştir. Fakat artan takviye fazı

oranının malzemelerin sertlik değerlerini arttırırken dayanım özelliklerini kötü yönde etkilediğini vurgulamıştır. Kesme deneyleri sonucunda, talaşların kısa yay formulu oluştuğunu belirtmiştir. Al_4C_3 takviye fazı bakımından yüksek hacim içerikli MMK’lerde, yığıntı talaş (YT) oluşumunun ve yüksek kesme hızlarında yüzey pürüzlülük değerinin azaldığını tespit etmiştir. Al_4C_3 takviye fazının işleme deneylerinde kayma düzleminde talaş çıkışının çatlak ilerlemesi şeklinde oluştuğunu ve bu durumun kesme kuvvetlerini düşürerek takım-talaş temas boyu ve deforme olmuş talaş kalınlığını azalttığını vurgulamıştır [47].

Pramanik ve Zhang (2006), 6-18 μm boyutlarında 6061 Al alaşımı matrisli %20 SiC parçacık takviyeli kompozit malzemenin işlenebilirliğini ÇKE; TPMN 160304 formulu takımla incelemişlerdir. Dört farklı ilerleme (0,1, 0,15, 0,2 ve 0,25 mm/rev) ve kesme derinliği (0,25, 0,5, 1,0 ve 1,5 mm) ile 100, 200, 400, 600 ve 800 m/min kesme hızlarında 10 saniye süreyle kesme işlemi gerçekleştirmişlerdir. Her bir deney parametresi için kesme kuvveti ölçümü yaparak, deneylerde elde edilen talaşların kalınlıklarını mikrometre yardımıyla ölçmüşlerdir. Ayrıca, Al esaslı SiC ve Al_2O_3 parçacık takviyeli MMK malzemelerde kesme kuvvetlerinin tahmini için bir mekanik model sunmuşlardır. Bu modeli kuvvet oluşum mekanizmalarına göre: a) talaş oluşum kuvveti b) kazıma (pulluk etkisiyle) kuvveti c) parçacık kırma kuvvetinin değerlendirmesinde kullanmışlardır. Talaş oluşum kuvveti “Merchant analizi” kullanılarak bulunurken, matris kazıma deformasyonu “kayma hattı bölgesinin plastisite teorisi” yardımıyla ve son olarak parçacık kırılması “Griffith’in kırılma teorisi” ile formülize edilmiştir. Sonuç olarak elde edilen teorik modeller ile MMK malzemede talaş deformasyon mekanizmalarının çok iyi tanımlanabileceğini vurgulamışlardır [48].

Karakaş ve ark. (2006), ortalama boyutları sırasıyla 37, 33 ve 16 μm olan Al, Cu ve B_4C tozlarından, hacim oranı %80Al-4Cu matris fazı ve %20 B_4C takviye fazını oluşturacak şekilde hazırlanan toz karışımlarında, toz metalurjisi yöntemiyle MMK malzemeler üretmişlerdir. Sıvı faz sinterleme yoluyla ürettikleri 50x50x10 mm boyutlarındaki numuneler üzerinde frezeleme işlemi yaparak, malzemenin

işlenebilirliğini değerlendirmişlerdir. Beş farklı kesme hızı (100, 130, 169, 220 ve 286 m/min), sabit kesme derinliği ve iki ilerleme miktarında (1,5 mm/z ve 0,2 mm/z) kaplamasız, TiCN/Al₂O₃/TiN kaplamalı ve TiN/TiAlN kaplamalı karbür (K20) kesici takımların aşınma davranışlarını incelemişlerdir. Frezeleme işlemleri sonucunda yaptıkları optik ve SEM mikroskobu çalışmaları, kesme hızının artmasıyla takımlarda oluşan yan yüzey aşınmalarının arttığını ve BUE oluşumunun azaldığını göstermiştir. Ayrıca, bütün kesme hızları için TiCN/Al₂O₃/TiN kaplamalı kesici takımın en iyi aşınma direnci sergilediğini tespit etmişlerdir [49].

Çiftçi ve ark. (2004), ağırlıkça %8 ve %16 oranında, ortalama 30, 45 ve 110 µm ebatlarında SiC parçacık takviyeli kompozitleri ergimiş metal karıştırma ve basınçlı döküm yöntemini kullanarak üretmişlerdir. Kesme işlemlerini sabit ilerleme (0,12 mm/rev) ve kesme derinliğinde (1 mm) farklı kesme hızlarında (20, 40, 60, 80 m/min) kaplamasız karbür ve TiC/Al₂O₃/TiCN kaplamalı karbür kesici takımları kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Tornalama işlemiyle gerçekleştirdikleri deneylerde, kesici takım kaplamasının ve kesme hızı değişiminin etkileri ile bu parametrelerin yüzey pürüzlülüğüne etkisini araştırmışlardır. Deneyler sonucunda, kesme hızı ile birlikte takviye elemanı parçacık boyutu ve takviye oranının takım aşınmasını hızlandıran etkenler olduğunu tespit etmişlerdir. Takım aşınması yönünden kesici takımları incelediklerinde, kaplamalı karbür kesicinin tüm işleme koşullarında en iyi performansı gösterdiğini ancak kaplamasız karbür takımlarda ortalama yüzey pürüzlülüğü dikkate alındığında düşük kesme hızlarında en iyi performansı sergilediğini bildirmişlerdir. Kesici takımların SEM incelemeleri sonucunda, abrasiv aşınma mekanizmasının etkin olduğunu ve yüksek kesme hızlarında kesici kenar bölgesinde kırılmaların meydana geldiğini tespit etmişlerdir [50].

Davim (2002), ortalama 20 µm boyutunda SiC_p takviyeli A356/SiC_p/20 MMK malzemeyi ÇKE ve kimyasal buhar biriktirme (KBB) yöntemiyle elmasla kaplanmış sementit karbür kesici takımlarla işlemiş ve bu kesici takımların performansını karşılaştırmıştır. KBB ile elmas kaplanan sementit karbür kesici takımlarla deneyler 50, 60 ve 90 m/min kesme hızlarında yapılırken ÇKE kesici takımlarla deneyler 250, 350, 500 ve 700 m/min kesme hızlarında yapılmıştır. Elmas kaplamalı kesici takım

için takım aşınma kriteri 0,6 mm ve ÇKE kesici takım için ise 0,25 mm olarak alınmıştır. Her iki kesici takımda da artan kesme hızıyla takım aşınması artmıştır. KBB elmas kaplamalı kesici takımda 4,5 dakika sonra 0,6 mm takım aşınmasına ulaşılmış ve ÇKE kesici takımda ise 0,25 mm değerindeki takım aşınmasına 45 dakika sonunda ulaşılmıştır. Araştırmacılar, ÇKE kesici takımın elmas kaplamalı karbür kesici takımdan 50 kat daha iyi performans gösterdiğini belirtmişlerdir [51].

Özçatalbaş (2003), 150 μm boyutundaki Al tozlarını ortalama tane boyutu 24 μm olan siyah karbon tozları ile harmanlayarak yüksek enerjili karıştırıcı içerisinde farklı sürelerde (7.5, 10, 15, 20 saat) mekanik alaşımlama (MA) işlemine tabi tutmuştur. Karışım tozları, çift yönlü kalıp içerisinde 600 MPa basınç uygulayarak silindirik halka şeklinde ($\varnothing 30\text{-}10 \times 25$ mm) numuneler elde etmek için sıkıştırmıştır. Toz metalurjisi yöntemiyle ürettiği numuneler üzerinde metalurjik ve işlenebilirlik araştırmaları yapmıştır. Kesme deneylerini, 20 m/min'den 150 m/min'e değişen kesme hızlarında, 0,14 mm/rev ilerleme ve 1 mm kesme derinliğinde 0,4 mm uç yarıçapında kaplamasız karbür kesici takım kullanarak yapmıştır. Kompozit malzemenin kesilmesi sırasında meydana gelen talaş oluşumunu ani durdurma aparatını kullanarak incelemiş ve meydana gelen talaşların basit ve yay şeklinde olduğunu tespit etmiştir. Matris malzemesi içindeki Al_4C_3 parçacık miktarının artmasıyla birlikte artan sertliğin, yüksek kesme hızlarında yüzey kalitesini artırırken BUE oluşumunu azalttığını belirtmiştir. Ayrıca kayma düzleminde meydana gelen kırılmanın etkisiyle takım-talaş temas uzunluğu ve talaş parçalarının kısalacağını tespit etmiştir. MA süresinin artmasıyla meydana gelen homojen parçacık dağılımı ve yüksek sertliğin, özellikle yüksek kesme hızlarında BUE oluşumunu azaltarak işlenmiş yüzeyin kalitesini artırdığını vurgulamıştır. Ayrıca, orta kesme hızlarında ısı yumuşamaya bağlı olarak artan BUE oluşumu, talaşların süreksiz tabaka halinde oluşmasına ve yüzey kalitesinin azalmasına neden olduğunu belirtmiştir [52].

Çiftçi ve ark. (2004), ağırlıkça %16 oranında ortalama 30, 45 ve 110 μm boyutlarında SiC_p takviyeli 2014 AA esaslı kompozitin torna tegahında işlenebilirliğini incelemişlerdir. İşlenebilirlik çalışmalarını, KBN kesici takım

kullanarak kuru kesme şartlarında torna tezgahında yapmışlardır. Deneylerde, sabit ilerleme miktarı (0,12 mm/rev) ve kesme derinliği (1 mm) ile 50m/min'den 200 m/min'e değişen kesme hızlarını kullanmışlardır. Kesme işlemi sonucunda oluşan takım aşınmasını, yüzey pürüzlülüğünü ve yığma kenar oluşumunu incelemişlerdir. Bütün kesme hızı değerlerinde en kötü yüzey 110 μ m boyutunda SiC_p takviyeli kompozitin işlenmesi sırasında elde edilmiştir. SiC parçacığının büyük olması takım üzerinde daha fazla aşınmaya ve bunun sonucunda kötü bir yüzey elde edilmesine neden olmuştur. Yapılan çalışmada 30 ve 45 μ m tane boyutlu SiC_p ile takviyeli MMK'ların 150 m/min kesme hızında, işleme deneylerinde kullanılan diğer kesme hızı değerlerine kıyasla, KBN takımlarda daha az yan yüzey ve burun aşınmasına neden olduklarını tespit etmişlerdir [53].

Hung ve ark. (1995), geliştirilebilen mekanik özelliklerinden dolayı MMK'ların birçok endüstriyel alanda kullanımlarının gün geçtikçe artarak yaygınlaştığını belirtmişlerdir. Diğer yandan, maliyete duyarlı üretimlerde işleme maliyetlerinin yüksek olması nedeniyle her uygulama için uygun olamayacaklarını da bildirmişlerdir. Yapmış oldukları çalışmada, geleneksel döküm ve toz metalurjisi ile üretilmiş SiC_p takviyeli kompozitlerin işlenebilirlik özelliklerini araştırmışlardır. Bunun için takım malzemesi, parçacık dağılımı, işleme yüzey özelliklerinin takım aşınmasına etkilerinin önceden tespit edilebilmesi için matematiksel bir model geliştirmişler ve bunu işlenebilirlik deney sonuçları ile kıyaslamışlardır. SiC parçacık takviyeli MMK'ların kaba talaş işlemlerinin karbür kesici takımlarla ve ince talaş alma işlemlerinin de ÇKE kesicilerle yapılması halinde ekonomik olarak işlenebileceklerini tespit etmişlerdir. Döküm yoluyla üretilmiş kompozitlerin toz metalurjisi ile üretilen kompozitlere nazaran daha zor işlendiklerini belirtmişlerdir. Bunun nedeni olarak da bu yöntemle takviye elemanlarının formunu koruması ve homojen dağılımın elde edilme kolaylığını göstermişlerdir. İşlenebilirlik değerlendirmelerinde kesici takım özelliklerine bağlı olmaksızın işlenen yüzeylerde parçacık kırılmaları ve ara yüzey bağından ayrılarak çıkmış takviye elemanlarının var olacağını vurgulamışlardır. Bu durumun kritik uygulamalar için kullanılan MMK'larda göz ardı edilemeyeceğini bildirmişlerdir [54].

Clark (1994), hacimce %20 oranında ortalama 15 μm büyüklüğündeki SiC_p takviyeli alüminyum alaşımlı kompozitlerin (Al-%20 SiC_p MMK) Syndite çok kristalli elmas (ÇKE) kesici takımlarla işlenebilirliğini inceleyerek, bu kesici takımları tungsten karbür takım (K10) ile kıyaslamıştır. Otomobilin fren diskleri olarak üretilen bu Al-%20 SiC_p MMK'lar üzerinde yapılan tornalama, frezeleme, delme ve boşaltma gibi işlemler sonucunda, takım ömrü ve yüzey kalitesi bakımından en iyi kombinasyonu Syndite CTB025 (kaba taneli) ÇKE takımı göstermiş, bununla beraber bazı delme işlemlerine CTB010 (orta taneli) ÇKE takımı da başarılı bir şekilde kullanılmıştır. 0,3 mm/dev ilerleme miktarının altında 400 m/min kesme hızının üzerinde Syndite ÇKE kesici takımla 1 μm ortalama yüzey pürüzlülüğü (R_a) değerinden daha iyi bir yüzey kalitesi elde edilmiştir [55].

Andrewes ve ark. (2000), ortalama 12,8 μm boyutunda SiC_p Al matrisli MMK malzemenin işlenebilirliğini deneysel olarak incelemişlerdir. Kompozit malzemenin işlenmesi esnasında, ÇKE ve KBB yöntemiyle elmas kaplanmış karbür kesici takımların aşınma karakteristiklerini belirlemeye çalışmışlardır. Bütün kesme deneylerini kuru kesme şartlarında, 1 mm kesme derinliği, 0,1 mm/rev ilerleme ve 190 m/min kesme hızında yapmışlardır. ÇKE kesici takımdaki aşınmanın başlangıçta iş parçası malzemesi içinde bulunan SiC_p 'den kaynaklandığı belirtilmiştir. ÇKE, SiC_p 'den daha sert olduğu için burada oluşan abrasiv aşınmanın mikro-kesmeden ziyade mikro-mekanik deformasyonla ilişkili olabileceğini belirtmişlerdir. Yan yüzey aşınmasının, iş parçası malzemesinin yapışmasını teşvik edeceği ve bu bölgenin üçüncü kesme bölgesinde (takım-iş parçası arayüzeyi) oluşan yüksek basınçtan dolayı çoğunlukla alüminyum filmle kaplanacağını belirtmişler ve yapılan EDAX analiziyle bu yüzeyin ince bir alüminyum tabakası ile kaplandığını göstermişlerdir. Bu durumun, abrasiv aşınmaya ilave olarak adhesiv aşınma mekanizmasının da kesici takım aşınmasında etkili olduğunu gösterdiğini vurgulamışlardır. Alüminyum filmin aşınmış yüzeye yapışması ve daha sonra SiC_p uzaklaştırılmasıyla bir kısım ÇKE parçacıklarının da alüminyum filmle beraber kesici takımdan ayrılarak aşınmayı gerçekleştirdiğini tespit etmişlerdir. Sonuçta, ÇKE kesici takım için toplam işleme zamanını 53 dakika, elmas kaplamalı karbür kesici takım için ise 19 dakika olarak belirlemişlerdir [56].

2.3. Literatür Araştırmasının Değerlendirilmesi

2.3.1. MMK'ların üretimi ve mekanik özellikleri ile ilgili literatür özeti

Literatür araştırmalarından kompozit malzemelerin kullanım alanlarının yaygınlaştırılmasının, ekonomik üretim ve iyileştirilmiş mekanik özelliklere bağlı olduğu anlaşılmaktadır. Bu amaçla kompozitlerin üretiminde kullanılacak yeni üretim yöntemlerinin geliştirilmesi ya da var olan yöntemlerde karşılaşılan üretim zorluklarının azaltılmasına yönelik birçok çalışma yapıldığı görülmektedir. Araştırmaların çoğunda, kompozit malzemelerin mikroyapı ve mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi ve bunun içinde uygun üretim ve uygun matris-takviye elemanı kombinasyonlarının belirlenmesi hedeflenmiştir. Üretilen kompozitlerde matris malzemesine göre sertlik, çekme dayanımı, elastikiyet modülü, aşınma dayanımı ve yüksek sıcaklık dayanımlarında artışa karşılık kırılma dayanımında azalma olduğu belirtilmektedir.

MMK malzemelerin üretiminde ergimiş metal karıştırma, sıvı metal emdirmeye (infiltrasyon), reaksiyonla denge halinde faz oluşturma, toz metalürjisi ve sıcak presleme yaparak difüzyonla bağ oluşturma yöntemlerinin yaygın olarak kullanıldığı görülmektedir. Bu yöntemlerin birbirlerine göre kısıtlı ve dezavantajlı yanlarının olduğu görülmüştür. Bunların yanında genelde tek tip takviye elemanları ile değişik yüzde hacim ya da ağırlık oranlarında kompozitlerin üretiminin gerçekleştirildiği görülmektedir. Ergimiş metal karıştırma ve sıkıştırma yöntemlerinde, parçacık takviyeli kompozitlerin karıştırma işleminin genellikle tek karıştırıcı ile yapıldığı ve bunun etkili bir üretim parametresi olduğu görülmüştür. Bu yöntemin kısıtlı yanının uzun elyaf takviyeli kompozitlerin imaline uygun olmamasıdır. Toz metalürjisi ve sıcak presleme yöntemlerinde ise parçacıklar ile matris tozlarının mekanik alaşımlama veya turbula cihazında karıştırılarak sıkıştırılması uygulamasının yoğun olarak araştırıldığı görülmektedir. Bu yöntemlerde, optimum yoğunluk ve mükemmel mekanik özellikler elde edebilmek amacıyla farklı sinterleme sıcaklığı ve sürelerinde çalışıldığı tespit edilmiştir.

Mekanik özellikler yönünden literatür incelemeleri özellikle parçacık takviyeli kompozitlerde paylaşıma dayalı bir yük taşıma özelliğinin var olduğunu göstermektedir. Mekanik özelliklerin belirlenmesinde parçacık oranı, parçacık boyutu ve parçacıkların matriste homojen dağılımının yanı sıra uygun özelliklere sahip ara yüzey bağının elde edilmesinin etkili rol oynadığı tespit edilmiştir. Takviye elemanı oranının artmasıyla mekanik özelliklerin geliştiği (özellikle sertlik ve çekme dayanımı), fakat belli bir orandan sonra mekanik özelliklerin kötüleşmeye başladığı (özellikle tokluk ve kırılma dayanımı) tespit edilmiştir. Bu nedenle üretim yöntemi farkı gözetilmeksizin, uygun takviye elemanı oranının belirlenmesi ve güçlü matris-takviye elemanı arayüzey bağı oluşturulması, mekanik özelliklerin geliştirilmesinde temel etkenler olarak görülmektedir.

2.3.2. MMK'ların işlenebilirlikleri ile ilgili literatür özeti

MMK malzemeler, geleneksel metal ve alaşımlarına göre üstün özellikleri nedeniyle imalat endüstrisinde ilgi çeken bir malzeme grubudur. Çeşitli yöntemlerle üretilmiş MMK malzemeler, istenilen son şekle yakın üretilmiş olsalar bile genellikle talaşlı imalat yöntemi ile istenilen boyut ve yüzey kalitesine getirilmeleri gerekmektedir. Fakat MMK'ların takviye fazını oluşturan seramik parçacıkların dayanımının ve elastikiyet modülünün yüksek ve oldukça sert olmaları, bu malzemelerin işlenebilirliklerinin zor olmasına sebep olmakta ve buna bağlı olarak kullanım alanlarının yaygınlaşmasını engellemektedir. Günümüzde talaşlı imalatta kullanılan kesici takım malzemelerinin birçoğu (HSS, karbür, seramik ve KBN) kompozit yapı içerisinde yer alan takviye elemanlarından (SiC , Al_2O_3 , B_4C gibi) ya daha düşük sertlikte dirler ya da sadece bir miktar fazla serttirler.

MMK malzemelerin işlenebilirliğinin değerlendirilmesinde; işleme şartları açısından genellikle kesme parametreleri, talaş oluşumu, takım aşınması, kesici takım geometrisi ve malzemesi ile yüzey kalitesi, kompozit malzeme üretim süreci açısından sıvı hal üretim yöntemi ve katı hal üretim yöntemleri (matris fazı, takviye elemanı tipi, boyutu ve ağırlık/hacim oranı, ısıtma işlemleri, sinterleme süresi ve sıcaklığı, sıkıştırma basıncı, toz karıştırma yöntemi vb. parametreler) çalışmalarının

yapıldığı anlaşılmaktadır. Parçacık takviyeli MMK malzemelerin işlenebilirliği üzerine yapılan çalışmalar, bu malzemeleri işlerken kaba talaş alma işlemlerinin SK ya da KBN kesici takımlarla, ince talaş alma işlemlerinin ise ÇKE kesici takımlarla kabul edilebilir bir takım ömründe yapılabileceğini bildirmektedir. Özellikle, toz metalurjisi ile üretilen MMK malzemelerin, ÇKE takımlarla düşük kesme derinliği ve yüksek kesme hızlarında işlenmesi ile mükemmel yüzey kalitesinin elde edilebileceği vurgulanmıştır. ÇKE takımların çok pahalı olması ve kaba işlemler için de uygun olmaması daha ucuz alternatif takımlara olan ihtiyacı gündeme getirmektedir. KBN kesici takımlar oldukça yüksek sertliklerinden dolayı sementit karbür kesici takımlara göre oldukça iyi performans sergilemektedirler. Sementit karbür kesici takımların ise yalnızca düşük kesme hızları ve yüksek ilerleme miktarlarında, kısmen kullanılabileceği önerilmektedir.

MMK malzemelerin işlenmesi sırasında seramik parçacıkların kırılması ve kesici takımındaki talaş yapışmasının azalması, işlenmiş yüzeyin bütünlüğünü büyük oranda etkileyen tipik hasar mekanizmaları olarak göze çarpmaktadır. Parçacıklar kesme işlemi boyunca takım tarafından sökülerek büyük oyuklar, delikler ve kraterlere neden olup malzemenin yorulma kırılmasını kolaylaştırır. İşlenmiş yüzeydeki şiddetli hasarlar kesme işlemi süresince oluşan yüksek sıcaklık değişimleri sebebiyle olabilir. MMK'da meydana gelen plastik deformasyonun sonucu olarak metalürjik dönüşümler ve şiddetli sertlik değişimleri meydana gelmekte, özellikle alüminyum gibi sünek matrislerde mikro ve makro kırılmaların yanı sıra kalıcı gerilmeler meydana getirmektedir. Ayrıca takım yan yüzeyi ve işparçası arasındaki arayüzey boyunca malzemenin sıkışması nedeniyle kesici takım hızla deforme olabilmektedir. Ayrıca, MMK malzemenin kesilmesi süresince, sünek olan alüminyum matris kesici takımın meydana getirdiği homojen olmayan plastik deformasyon sonucunda yüksek basma gerilmelerine maruz kalmaktadır. Bu süreç neticesinde, kesme işlemi boyunca işparçası malzemesinden kesici takıma yapışan küçük parçacıklar yüksek sıcaklık ve basınç etkisiyle kalıcı yapışmalara neden olmaktadır. Bu oluşum, bazen takım kenarında toplanan talaşların büyümesi ve kararsız bir yapı oluşturmaya bağlı olarak hem kesici takımın ömrünü azaltmakta hem de işlenmiş yüzeyde mikro bozukluklara neden olarak yüzeyin kalitesini düşürmektedir.

2.3.3. Genel değerlendirme

Yapılan alışmalar, genellikle alüminyum ve alaşımlarının matris fazı olarak kullanılarak, takviye elemanın ise farklı seramiklerden seçilerek üretilen MMK malzemeler üzerine yoğunlaşmıştır. Ancak, takviye elemanı boyutu ve içeriğinin bu malzemelerin işlenebilirlikleri üzerindeki etkisini inceleyen sistemli olarak yapılmış çalışma sayısı oldukça azdır. Özellikle bitirme işlemlerinde, ÇKE kesici takımların bu malzemelerin işlenmesinde en iyi kesici takım olduğu görölmektedir. Fakat maliyet açısından düşünöldüğünde ekonomik olmadığı da açıktır. Bu nedenle seramik parçacıklarla takviyeli MMK'ların işleme maliyetlerinin azaltılması ve işlenmiş yüzey kalitesinin optimum sağlanması amacıyla farklı kesici takımlarla işleme özelliklerinin optimum değerlerinin tespiti gerekmektedir.

Bu alışmada, Toz Metalurjisi (TM) yöntemi kullanılarak üretilen Alumix 231 (Al-Si alaşımı) matrisli SiC_p takviyeli kompozit malzemelerin bazı mekanik özellikleri belirlenmiştir. Buna ek olarak, ağırlıkça üç farklı oranda üretilen kompozit numuneler üzerinde üç farklı kesici takım malzemesinin kesme performansının değerlendirilmesi amacıyla işlenebilirlik deneyleri gerçekleştirilmiştir. Al-Si alaşımlarının yüksek miktarlarda Si içermesi nedeniyle, o malzemenin başlı başına bir kompozit malzeme gibi değerlendirildiği ve yüksek aşınma dirençli malzemeler gerektiren makine parçalarının imalatında kullanıldığı literatürden bilinmektedir [57]. Mikroyapısında %14 oranında Si içeren matris alaşımına SiC_p ilave edilerek yeni bir malzeme üretilmiş olması, üretilen kompozit malzemenin mekanik özelliklerinin belirlenmesi ve bu malzemelerin işlenebilirlik özelliklerinin farklı kesici takımlarla incelenmesi çalışmanın orjinalliğini göstermektedir. Ayrıca, yapılan işlenebilirlik deneyleri sonucunda elde edilen verilerin, TM yöntemiyle üretilen kompozit malzemeler üzerinde gerçekleştirilen ikincil işlemlere örnek teşkil edeceği düşünölmektedir.

3. KOMPOZİT MALZEMELER

3.1. Kompozit Malzemelerin Tanımı ve Sınıflandırılması

Geleneksel mühendislik malzemeleri olarak adlandırılan metal, seramik ve polimer malzemelere ilave olarak kompozit malzemeler de ayrı bir grup mühendislik malzemesi olarak tanımlanmaktadır. Kompozit malzemeler ise tamamen bağımsız olarak düşünülemeyecek bir malzeme grubunu temsil etmektedir [8]. Kompozit malzemelerin genel olarak kabul edilmiş bir tanımı olmamakla birlikte en geniş anlamda kompozit malzeme; “çok kristalli birden fazla ve farklı metal ve metal olmayan bileşenlerin bir arada toplanması” olarak ifade edilmektedir. Bileşenlerin kompozisyonlarını ve yapısal şeklinin her ikisini de hesaba katan bir başka tanımlama ise “aynı veya farklı gruptaki malzemelerin en iyi özelliklerini yeni ve tek bir malzemedeki toplamak amacıyla, birbiri içerisinde çözünmeyen ve birbirlerinden farklı şekil ve/veya malzeme kompozisyonuna sahip iki veya daha fazla makro bileşenin karışımından veya birleşmesinden oluşan bir malzeme sistemi” şeklinde yapılmaktadır [58].

Son yıllarda teknolojiye hızlı gelişmelere bağlı olarak, geleneksel malzemelere göre daha üstün özelliklere sahip kompozit malzemelerin kullanım ihtiyacı artmakta ve pek çok çeşit kompozit malzeme üretilmektedir. Üretilen kompozit çeşitleri ve üretim yöntemleri çok farklı olduğundan ayrıca bir sınıflandırma ihtiyacı duyulmuştur. Kompozit malzemeleri değişik yollarla sınıflandırmak mümkündür. Matris malzemelerine göre polimer, seramik ve metal matrisli kompozit malzemeler olarak üç gruba ayrılırlar. Seramik Matrisli Kompozit (SMK) malzemeler doğal olarak yüksek sıcaklık direncine sahip iken, kaba uygulamalarda gevrek yapısı nedeniyle kırılmaya karşı eğilimleri yüksektir. Polimer Matris Kompozit (PMK) malzemelere göre Metal Matrisli Kompozit (MMK) malzemeler yüksek özgül dayanım, yüksek özgül rijitlik ve yüksek sıcaklıktaki iyi mekanik özellikler ve seramiklere göre yüksek tokluk sergilemenin yanında, çoğunlukla iyi aşınma ve sürtünme direncine sahiptirler [59]. Yukarıda bahsedilen bu özellikler sayesinde

MMK malzemeler, endüstride çok önemli bir konuma gelerek daha yaygın kullanılan kompozit malzeme sınıfı haline gelmiştir.

3.2. Matris Malzemeleri ve Özellikleri

MMK malzemelerin üretiminde matris malzemesi olarak çok değişik metal ve metal alaşımları kullanılmaktadır. MMK malzemelerde matrisin iki önemli görevi vardır. Birincisi, tasarlanan malzeme formunu koruyarak bir arada tutmak ve uygulanan herhangi bir kuvveti, tahribata uğramadan, ara yüzey bağı vasıtası ile takviye fazına iletme ve dağıtmaktır. İkincisi ise, kompozitin imalatında seçilmiş olan matris fazının çalıştığı ortamlarda kendisinden istenilen bir takım özellikleri de yerine getirmesidir [5]. Örneğin; sulu veya oksitlenme olabilecek bir ortamda çalışan kompozit malzemenin oksidasyon ve korozyona karşı dirençli olması, elektrik iletkenliğinin ya da elektrik iletkenliğine karşı direncin istenildiği yerlerde ise yine bu görevi matris fazının üstlenmesi beklenmektedir. Bu görevlerinin yanında matris fazının hafif, kolay elde edilebilir, termodinamik değişimlere karşı uyum gösterebilmesi gibi özellikleri de taşıması gerekmektedir [2]. Matris malzemesinin seçiminde dikkat edilmesi gereken hususlar:

- Tasarlanan kompozitin üretim yöntemi,
- Kullanılacak olan takviye fazının uyum durumu (matris malzemesinin ısılatma kabiliyeti, ısı genleşme katsayı farklılıkları, vb.),
- Üretim sırasındaki matris fazından istenilen hal değişimleri,
- Üretim sonrası uygulanacak olan ısı işlemi,
- Mekanik şekil değiştirme kabiliyetleri,
- Kompozitin sergilediği mekanik ve fiziksel özellikler (dayanım, süneklik, tokluk vb.),
- Kullanım alanının durumu,
- Montaj işleminin tipi (civatalı, perçinli, kaynaklı, vb.),
- Üretim sonrası kullanılacak son profilin verilmesindeki işleme yöntemi

şeklinde sıralanabilir [5, 33].

Kompozit malzemelerin imalatında matris malzemesi olarak başarıyla kullanılabilen malzemelerin başında plastik ve türevleri, metaller ve seramikler gelmektedir. Bunlara ilaveten refraktör malzemeler olarak adlandırılan cam, karbon, grafit gibi malzemelerde kompozitlerin imalatlarında kullanılmaktadır. MMK malzemelerde matris malzemesi olarak Al, Ti, Mg, Ni, Cu, Pb, Fe, Ag, Zn, Sn ve Si gibi hafif metaller ve alaşımları kullanılmakla birlikte en yaygın olarak kullanılanları Al, Ti, Mg ve Cu'dur [5]. Özellikle, otomotiv ve uzay endüstrisinde yapılan çalışmalarda iyi korozyon direnci, düşük yoğunluk, tokluk, yüksek ısı iletkenlik ve nispeten iyi mekanik özellikleri nedeniyle alüminyum alaşımları matris malzemesi olarak yoğun bir şekilde kullanılmaktadır [1].

3.2.1. Alüminyum (Al) ve Al alaşımları

Alüminyum ve alaşımları düşük yoğunlukları, iyi tokluk, dayanım ve süneklik özelliklerine sahip olmakla birlikte atmosfere ve diğer ortamlara karşı yüksek korozyon dirençleri ile bilinen şekillendirme kabiliyetleri yüksek malzemelerdir. Ayrıca, alüminyum iyi elektriksel ve ısı iletkenliğe, yüksek ısı iletme ve ışık yansıtma özelliklerine sahiptir. Bunun yanında mekanik özelliklerinin ikincil işlemlerle modifiye edilebiliyor olması gibi avantajlı özelliklerinden dolayı genellikle otomotiv, spor, uzay ve havacılık endüstrilerinde tercih edilen malzemelerin başında gelir. Başlıca alaşım elementleri Mg, Mn, Si, Cu ve Zn' dir. Bunlardan Al-Cu-Mg ve Al-Zn-Mg-Cu içerikli alüminyum alaşımları, yaşlandırma yöntemi ile sertleşebilmektedirler [60].

Yukarıdaki bu iyi özelliklerinin yanında Al'nin döküm yoluyla üretilmesinde, oksijene olan yüksek ilgisi nedeniyle, mekanik özelliklerinin kötü yönde etkilenmesi söz konusudur. Ayrıca, Al matrisli kompozitlerde sıklıkla kullanılan SiC ve Al_2O_3 takviye elamanları matrisin ıslatma problemi nedeniyle iyi arayüzey bağının oluşmasına engel oluşturmaktadır. Bu problem bakır, magnezyum, demir ve çinko içeren Al alaşımları kullanılarak [61] veya bu alaşım elementleri ile üretimlerinde asal gazlardan (argon, azot, helyum) oluşan koruyucu atmosferler kullanılarak en aza indirilebilmektedir. Ayrıca kaynak edilebilirliklerinin çeliklere göre daha kötü olması

da dezavantajlı yanlarından biridir. Al alaşımları, üretim yöntemlerine göre işlem alaşımları ve döküm alaşımları olarak iki ana gruba ayrılmaktadır. İşlem alaşımları; yeniden ergitme ve döküm, ön ısıtma veya homojenizasyon, sıcak haddeleme, soğuk haddeleme işlemlerinden geçerek üretilmektedir. Bu Al alaşımları dört basamaklı bir kodlama yöntemi ile içerisinde yer alan ana alaşım elementlerine göre gruplandırılmaktadır (2xxx, 3xxx vb.). Döküm alaşımlarında da yine işlem alaşımlarına benzer, dört basamaklı bir kodlama yöntemi kullanılmaktadır. Fakat son sayıyı nokta ya da kesir işareti ile ayrılmaktadır (2xx.x, 3xx.x vb.) [60].

3.2.2. Titanyum alaşımları

Titanyum (Ti) alaşımları uzay endüstrisinin vazgeçilmez malzemelerinden biridir. En önemli özellikleri arasında yüksek ergime sıcaklığına sahip olması, diğer metallere göre ısıl genleşme katsayısı ve ısı iletim katsayısının düşük olması, yoğunluğunun düşük olmasına rağmen dayanım özelliklerinin iyi olmasıdır. Tüm bu iyi özellikler titanyumun havacılık ve uzay endüstrisinde ideal bir malzeme olmasını sağlamaktadır. Ti alaşımları jet motorlarındaki türbin ve kompresör kanatlarında halen kullanılmaktadır. Bunun yanında titanyumun, oksijen, hidrojen ve azota olan duyarlılığı sebebiyle, bu gazlar Ti parçaların mekanik özelliklerini değiştirebilmekte ve kaynak edilebilirlik özelliğini kaybetmesine neden olmaktadır. Titanyum, yalnızca vakumlu ortamda elektron ışın tekniği ile kaynak edilebilmektedir [1].

Titanyum hemen hemen bütün silikat taşlarında (TiO_2), ilmenit (FeTiO_3) mineralinde ve boksitte bulunur. Saf titanyum eldesi TiCl_4 bileşiğinin magnezyum ile indirgenmesi sonucunda elde edilir [10].

3.2.3. Magnezyum alaşımları

Günümüzde magnezyum, tuzlu su kaynaklarından ve deniz suyundan elde edilen bir bileşik olan erimiş magnezyum klorürün elektroliziyle elde edilmektedir [60]. Konstrüksiyon malzemesi olarak kullanılan metalik malzemeler içinde Magnezyum (Mg) en hafif olanıdır. Yoğunluğu ve buharlaşma özellikleri bakımından plastiklere

benzerken, metallerin de mekanik özelliklerini sergilemektedir. Ayrıca Mg, plastiklere göre çok daha katı ve çok daha fazla geri dönüşümü mümkün bir malzemedir. Bu alaşımlar kara taşıtlarında, elektronik, bilgisayar ve spor gereçleri endüstrisinde kullanım alanı bulmaktadır. Mg alaşımlı MMK'ler, 350 °C'nin üzerindeki çalışma sıcaklıklarında motor elemanlarında (örneğin piston üretiminde) kullanılmaktadır [62]. Geleneksel Mg alaşımları, katı eriyik sertleştirilmesi ve çökelti sertleştirilmesi mekanizmaları ile güçlendirilmektedir.

Katı eriyik sertleştirilmesi tamamen elementlerin atomik boyutları ile ilgilidir. Magnezyum içinde maksimum çözünebilen elementler IIB grubu elementleridir. Bunlardan en önemlileri çinko ve kadmiyumdur. Sadece kadmiyum yüksek sıcaklıklarda (>253 °C) magnezyum ile sürekli katı eriyik oluşturur. Magnezyumun önemli alaşım grupları; magnezyum-alüminyum, magnezyum-çinko ve magnezyum-toprak alkali olarak gruplandırılırlar. Ama en geniş spektrum alüminyum ve çinko grubudur [62].

3.2.4. Bakır alaşımları

Bakır (Cu), alaşımsız ve alaşımlı olarak endüstrinin birçok alanında yaygın olarak kullanıldığı için önemli bir mühendislik malzemesidir. Alaşımsız yapıda elektrik iletkenliğinin iyi oluşu elektrik endüstrisinin esas malzemesi olmasını sağlamıştır. Yüksek elektrik iletkenliği, korozyon direnci, kolay fabrikasyon için yeterli çekme dayanımı, kontrol edilebilen tavlama özellikleri ve genel lehimleme ve birleştirme özellikleri bakırın bazı önemli özellikleri arasındadır. Diğer metaller ile alaşımlandırılması sonucu elde edilen pirinç ve bronzun geniş çeşitliliği pek çok mühendislik uygulamaları için kullanım alanını arttırmaktadır. Cu ve Cu alaşımları, bakır geliştirme birliği ile yönetilen bir tasarım sistemine göre sınıflandırılır. Bu sistemde C100'den C799'a kadar numaralar dövme alaşımları, C800'den C999'a kadar numaralar ise döküm alaşımlarını tanımlamak için kullanılır [60].

Cu alaşımlı MMK malzemeler genellikle, toz metalürjisi ve ergimiş metal karıştırma yöntemleri ile seramik ya da grafit parçacık ve partiküllerle takviye edilerek, elektrik

motorları ve çeşitli endüstri makinelerinde, yataklama elemanı olarak, sürtünme dirençlerinin ve darbe dayanımlarının iyi olması nedeniyle yaygın olarak kullanılmaktadır [60]. Bakır ve alaşımlarının yalın halde genel amaçlı kullanım alanları ise, gaz ve ısıtıcı hatları, yağ boruları, bakır conta, boru ve tüp tesisatı, kondansatör, buharlaştırıcı, ısı değiştirgeçleri, mandıra, su ve buhar hatları arıtma boruları, hava benzin hidrolik hatları akım baraları, motor kolektörleri, elektrik-elektronik sanayi, enerji nakil ve telefon hatları, motor, jeneratör, transformatör, ölçü cihazları sargıları, kontaktörler, ısı eşanjörleri, otomobil radyatörleri, çatı kanalları ve çatı kaplama, gıda sanayi ekipmanları, radar, redükleyici gaz ortamında yüksek sıcaklıkta kullanılan elektrik ekipmanları, radyatör, vb.'dir.

3.3. Takviye Malzemeleri ve Özellikleri

MMK malzemelerin üretimlerinde, takviye elemanları istenilen özel dayanım özelliklerini yansıtacak şekilde farklı tip ve formlarda kullanılmaktadır. Takviye elemanları genellikle; fiber, kılcal kristal, ince plakalar, parçacık ve partikül formlarında kullanılmaktadırlar [28]. Özellikle 1930'lu yılların sonunda, polimer endüstrisinin gelişmesi ile birlikte cam fiberlerin mühendislik malzemelerinde kullanılmaya başlamasıyla, kompozit malzemeler önem arz etmeye başlamıştır. Polimerlerin fiberlerle takviye edilmesi sonucu elde edilen yüksek performans ve dayanım özellikleri, araştırmacıları bu alanda kullanılmak üzere farklı organik ve inorganik takviye elemanlarının geliştirilmesine yönlendirmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda boron, karbon, aramit ve yüksek modüllü fiber takviyeler geliştirilmiştir. Kompozitlerde kullanılan takviye elemanlarının, sadece yüksek dayanım ve yüksek rijitlik özelliklerine sahip olmaları değil, aynı zamanda çok iyi bir kimyasal kararlılık ve yüksek sıcaklıklara dayanım özelliklerinin olması beklenmektedir. Bu kriterlere uygun olarak yüksek sıcaklıklarda dayanım özellikleri bakımından, karbon fiberler, silikon bazlı nanoksit fiberler ve alümina bazlı oksitli fiberler, geniş bir uygulama alanına sahiptirler [2].

Kompozit malzemenin üretim yöntemi de takviye elemanı seçiminde önemli bir konudur. Örneğin; sıvı faz üretim yöntemlerinde üretim sıcaklığının yüksek olması,

matris ve takviye elemanı arasında kimyasal reaksiyonlar meydana getirmektedir. Üretim süresinin uzun olması ara yüzeyde meydana gelen etkileşimi arttırmaktadır. Ara yüzeydeki reaksiyonlar sonucu meydana gelen fazların özellikleri kompozit malzemelerin mekanik özelliklerini doğrudan etkilemektedir. Takviye elemanı seçimindeki bir diğer önemli etken, kompozit malzemenin maliyetidir. Ticari olarak üretilen kompozit malzemelerde maliyetin en düşük olması istenmektedir. Birçok uygulamada takviye elemanı olarak, maliyetlerinin fiberlere göre daha düşük olması nedeniyle, parçacık takviyeler tercih edilmektedir [63].

MMK malzemelerin üretiminde takviye elemanı olarak genellikle seramikler kullanılır. Seramikler oda sıcaklığında ve yüksek sıcaklıklarda yüksek dayanım ve rijitlik özelliği sergilemektedir. Takviye elemanının matris malzemesiyle kimyasal kararlılığı ve uyumluluğu MMK malzemelerin hem üretimleri hem de kullanımları sırasında önemlidir. Yaygın olarak kullanılan takviye elemanları SiC, Al₂O₃, TiB₂, boron ve grafitir [64]. Takviye elemanı seçiminde dikkate alınması gereken hususlar:

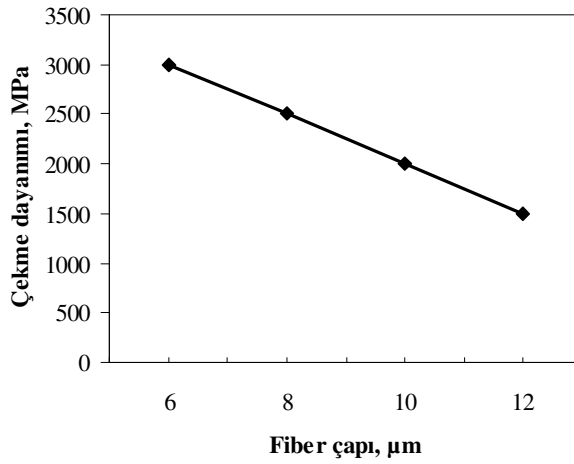
- Elastikiyet modülü,
- Çekme dayanımı,
- Yoğunluk,
- Ergime sıcaklığı,
- Kimyasal kararlılık,
- Isıl genleşme katsayısı,
- Boyut ve şekil,
- Matris malzemesiyle uyumluluk
- Maliyet

şeklinde sıralanabilir [5].

3.3.1. Fiberler

Genellikle enine kesitleri dairesel olup çapları yaklaşık olarak 100 µm dir. Boy/çap oranları 100 ve daha yukarı olanlar uzun fiber (elyaf), boy/çap oranları 10 ila 100

arasında olanlar kısa fiber olarak adlandırılmaktadır. Fiberler yapı bakımından karmaşık şekilli, çok kristalli ve tek kristalli yapıda olabilir. MMK malzemelerde fiberler genellikle mekanik özellikler ve yüksek sıcaklık dayanım özelliklerinin iyileştirilmesi amacıyla kullanılmaktadır. SMK'da ise genellikle matrisin tokluk özelliğinin iyileştirilerek, bu sayede mekanik özelliklerinin geliştirilmesi amacı ile kullanılmaktadırlar. Fiberlerle takviye edilmiş kompozitlerde dayanım özellikleri, fiberlerin yönüne ve çapına göre değişim göstermektedir. Fiberlerin çapının azalmasıyla kompozitin dayanım özellikleri artış göstermektedir. Şekil 3.1'de fiber çapı değişiminin kompozitin fiber eksen yönündeki çekme dayanımı üzerine etkisi görülmektedir [8].



Şekil 3.1. Fiber çapının çekme dayanımı üzerine etkisi [8]

MMK malzemelerde takviye elemanı olarak kullanılan fiber malzemeler; boron fiber, karbon ve grafit fiberler, yüksek performanslı organik fiberler, alümina ve alümina bazlı fiberler, silisyum karbür ve SiC esaslı fiberler, silisyum nitrür esaslı fiberler, metal esaslı çelik ve tungstenden yapılmış fiberlerdir.

Karbon ve grafit fiberler (yaklaşık 7,6 μm çapındaki karbon fiberler); ince ve sürekli şekilde kolaylıkla çekilebilen ve sarılabilen organik bir filamentin karbürlenmesi veya ısı etkisi ile eritilmesiyle üretilmektedir. Ön malzeme olarak bilinen organik filament genellikle naylon, poliakrilonitril veya zifttir. Karbonlama sıcaklığı 1000 °C'den 3000 °C'ye kadar yükseltilirken, elastikiyet modülü ile çekme dayanımı ters orantılı

olarak değişmektedir. Karbon fiberler yüksek modüllü olarak bilinmektedirler. Bunun yanında; rijitlikleri, düşük yoğunlukları ve düşük ısı genleşmeleri ilgi çekici özelliklerinin başında yer alır [1].

Boron fiberler, mukavemet ve elastikiyet modüllü özelliklerinin yüksek olması istenen kompozitlerin üretiminde kullanılırlar. Metal matrisler arasında en çok alüminyum matris ile birlikte kullanılırlar. Maliyetlerinin yüksek oluşu bu fiberlerin sadece özel uygulamalarda (uzay endüstrisi gibi) kullanılmasına neden olmaktadır. Boron fiberler alüminyum ve titanyum ile kompozit oluşturduklarında sıcaklık altında çabuk tepki verir. Alüminyum matrisli kompozitlerin imalatında yüksek sıcaklık kullanıldığında, boron fiberler üzerindeki difüzyonu engelleyen tabaka ortadan kalkar [28]. Seramik bazlı fiberler olarak bilinen Al_2O_3 , Si_3N_4 ve SiC esaslı fiberler, farklı üretici firmalar tarafından geliştirilerek değişik üretim yöntemleri ile üretilmektedirler. Yüksek elastik modülü ve dayanım özellikleri ile birlikte düşük termal genleşme katsayısına sahiptirler [8].

3.3.2. Kılcal kristaller

Kılcal kristal ya da tek kristalli parçacık olarak tanımlanan takviye elemanları, genellikle 1 μm 'den daha küçük çapta olup, boy/çap oranları ise 100'den küçüktür. Kılcal kristaller, yapılarının tek kristalli olması, ebat olarak oldukça küçük, yapısal özelliklerinin ve kimyasal kararlılıklarından dolayı mükemmel bir dayanım, elastik modül ve kırılma uzamasına sahiptirler. Fakat sürekli fiberlerle kıyaslandıklarında, kompoziti güçlendirme yönünden, fiberler kadar etkili değildirler. Buna rağmen MMK malzemeler ve SMK malzemelerde takviye elemanı olarak kullanıldıklarında, aşınma direncinin ve tokluğun geliştirilmesi bakımından katkıları göz ardı edilemez [8].

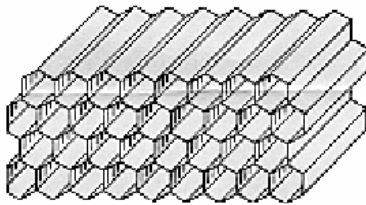
Kılcal kristallerde mekanik özellikler üzerinde etkili olan en önemli faktör kılcal kristalin çapıdır. Çapın artması ve boy/çap oranının azalması ile dayanım özelliklerinin muhtemelen artacağı bilinmektedir. Başlıca kullanılan kılcal kristaller, karbon, SiC, Safir ($\alpha-Al_2O_3$), Si_3N_4 , SiO_2 esaslı takviye elemanlarıdır. Kılcal

kristallerle yapılan çalışmalarda, mikron altı çapları ve iğnemi yapılarından dolayı, kompozitlerin üretimi esnasında ve talaşlı imalatla şekillendirilmelerinde insan sağlığını tehlikeli yönde etkileyeceği unutulmamalıdır [8].

3.3.3. İnce yassı parçacıklar ve/veya plakalar

İnce plaka halindeki parçacıklar genellikle, her yerde yaklaşık olarak aynı kalınlıkta fakat yüzey alanları değişebilen, mikron seviyesindeki ince yassı parçacıklardır. Parçacıklar ve fiberlere nazaran kompozit malzemelerde kullanımları sınırlıdır. Özel form verilmiş plakalardan en yaygın kullanılan ve bilinen tipi bal peteği formunda metal levhalardan şekillendirilmiş takviye elemanlarıdır. Bunlar genellikle büyük hacimli parçalarda, yüksek dayanım/ağırlık özelliği ve esneklik istenilen parçaların imalatında kullanılmaktadır. Oldukça hafif sistemler elde etmek için, sandviç yapıların iç ve dış tabakaları arasına petekli yapılar yerleştirilir. Tabakalar arasına petekli yapının yerleştirilmesi, yapının atalet momentinin ve eğilme dayanımının artmasını sağlar [28].

Kompozit imalatında kullanılan petekli yapı, çok ince tabakaların şekillendirilmesi sonucu elde edilen hücrelerin birleştirilmesi ile oluşturulur. Petekli kompozit yapılar yaklaşık olarak 1940 yılından sonra havacılık sektöründe, uçakların gövde panellerinde kullanılmaya başlanmıştır. Şekil 3.2’de altıgen hücreli petekli yapı görülmektedir.



Şekil 3.2. Altıgen hücreli petekli yapı [65]

Günümüzde kullanılan petekli yapıların büyük bir çoğunluğu bir yapıştırıcı sayesinde hücrelerin birbirleri ile yapıştırılması sonucu oluşturulurlar. Bir sandviç panel, petekli yapının alt ve üst yüzeylerin yapıştırıcı kullanılarak yüzey örtüleri ile

yapıştırılması sonucu elde edilir. Çelik, titanyum ve nikel alaşımlı metal hücre yapılı petekli yapılar yapıştırıcı yerine daha çok kaynak ve lehimleme ile birleştirilirler. Bu tür hücreler öncelikle yüksek sıcaklık uygulamalarında kullanılır. Yüksek rijitlik ve dayanım/ağırlık oranına sahip olan sandviç yapılar son derece hafif konstrüksiyonlardır. Petek yapılı kompozitler, diğer sandviç konstrüksiyon ara malzemelerine oranla daha pahalıdır ve sandviç yapı haline dönüştürülmesi daha özel işçilik gerektirmektedir. Bu nedenle, genellikle denizcilik, havacılık ve uzay sektöründe yüksek mekanik dayanım sağlamak amacıyla kullanılmaktadır [28].

3.3.4. Parçacık ve partiküller

Kullanım miktarları bakımından, kompozitlerin imalinde en yaygın kullanılan takviye elemanları arasında parçacıklar ve partiküller yer almaktadır. Boyutları 1 μm 'den daha büyük olanlar parçacık, 1 μm 'den daha küçük boyutlular ise partikül olarak adlandırılmaktadır [8].

Parçacık ya da partiküllerle takviyeli kompozitlerde matris içerisindeki takviye fazının hemen hemen homojen dağılım sergilemesi nedeniyle, kompozitin dayanımının özellikleri her yere yaklaşık olarak aynı özellikleri sergilemektedir. Partikül takviyeli kompozitlerde, matrisin içerisine yer alan partiküller nedeniyle, dağılım sertleşmesi ile mekanik özellikleri iyileşmektedir. Bu da partiküllerin tane sınırlarında oluşan kaymaları engellemesi ile gerçekleşmektedir. Bu tür partiküllerle takviyeli kompozitlerde takviye fazının malzemeye gelen yükü taşıması gibi bir durum söz konusu değildir.

Genellikle toz metalürjisi yöntemi ile malzeme üretiminde kullanılan metal tozlar, metal malzeme ve kompozit üretimi açısından ortalama boyutları birkaç mikrondan birkaç yüz mikrona kadar parçalanmış partiküllerdir. Tozun geometrik şekli, üretim yöntemine bağlı olarak küreselden dentritik formlara kadar farklılık göstermektedir. Aynı şekilde toz yüzeyinin düzgün veya gözenekli olması da yine üretim yöntemine göre değişiklik göstermektedir. Tozun ortalama boyutları, şekli ve yüzey durumu parça imalatı açısından önemlidir [6].

Parçacık olarak adlandırılan takviye elemanları genelde seramik parçacıklar, elmas tozları, grafit ve karbondan elde edilmiş 1 μm 'den büyük tanelerdir. MMK malzemelerin imalinde en yaygın olarak kullanılan parçacıklar; SiC, Al₂O₃, ZrO₂, TiC, TiB₂, Si₃N₄, WC, elmas, grafit, karbon gibi aşınma dayanımları yüksek belirli bir formları olamayan çeşitli seramik, karbür bileşikler, grafit ve karbon taneleridir. Çizelge 3.1'de çeşitli parçacık takviye elemanlarına ait teknik veriler yer almaktadır.

Çizelge 3.1. Çeşitli parçacık tipindeki takviye elemanlarının tipik özellikleri

<i>Malzemeler</i>	<i>Yoğunluk (gr/cm³)</i>	<i>Ergime Nok.(°C)</i>	<i>Sertlik (Mohr)</i>	<i>Isı iletkenliği KCal/sa/cm/°C</i>	<i>Isıl genleşme kat. (20-800°C)</i>
SiC _p	3,2	2320	9,2	35,83	4,68
Al ₂ O ₃	3,2-3,8	2015	9	2,04	7,9
Karbon	1,6	-	-	4-7	2,5
Grafit	1,6	-	-	104-127	1,8
SiO ₂	-	1727	7	1,37	43
WC	-	-	9	-	6,12
TiC	-	-	8-9	14,73	7,38
Zr ₂ O	-	2600	7-8	0,79	5,5

3.4. Metal Matrisli Kompozitler

Metal Matrisli Kompozit (MMK), ana malzemesi (matris) metal olan kompozit malzeme grubuna verilen genel addır. Matris malzemeleri çok çeşitli metal ve metal alaşımı olabilmektedir. MMK'larda en yaygın olarak kullanılan matris malzemesi, düşük yoğunluklu, iyi tokluk ve mekanik özelliklere sahip olan hafif metaller ve alaşımlarıdır. Bu hafif metal alaşımları dayanım ve özgül ağırlık oranlarının iyi olması nedeniyle hafif yapılarda tercih edilirler. Atmosfere karşı korozyon dayanımının da çok yüksek olması, diğer karakteristik özelliklerden biridir [66]. Metal matrisli kompozitlerde takviye sürekli fiber, kısa fiber, parçacık ve/veya partikül ve uzun fiber-whisker şeklindeki malzemelerdir. Takviye malzemeleri genelde oksit, karbür veya nitrür bileşimindeki malzemelerdir. Metal matrisli kompozit malzemelerin takviyesiz metallere ve polimer matrisli kompozitlere göre küçümsenmeyecek avantajları mevcuttur [1]. Bunlar:

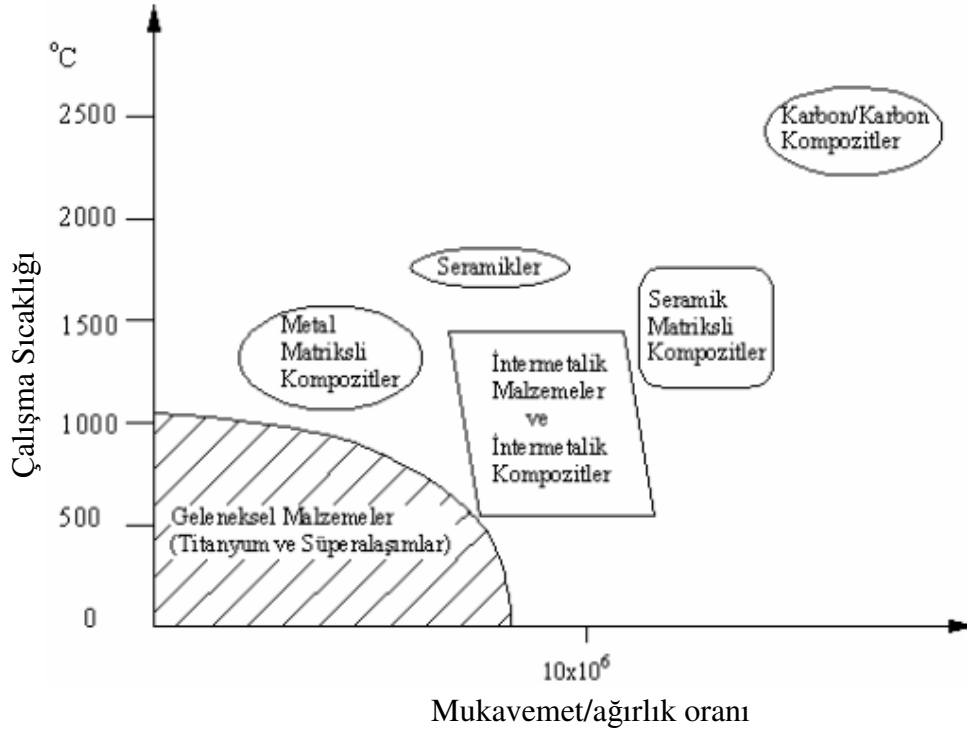
- Düşük ağırlık oranında yüksek dayanım,
- Mükemmel boyutsal tamlık (tekrar üretilebilirlik),
- Yüksek sıcaklıkta kararlılık (sürünme direnci),
- Yüksek mukavemet (çekme, basma, yorulma, aşınma ve kayma),
- Metallerin süneklik ve tokluk, seramiklerin yüksek mukavemet ve yüksek elastik modül özelliklerini birleştirme,
- İyi korozyon direnci,
- İyi elektrik ve ısı iletkenlik,
- Geliştirilebilir montaj kabiliyeti,
- Radyoaktif dayanıklılık,
- Çekicilik ve estetik görünüm

olarak sıralanabilir.

Yukarıda belirtilen bu özelliklerde malzeme sağlamak, uygun matris ve takviye eleman çifti, üretim tekniği, bileşenlerin mukavemet özellikleri ve diğer faktörler göz önüne alınarak yapılacak optimum üretim ile mümkündür. Uygun matris/takviye elemanı seçiminin, sistemin mekanik ve fiziksel özellikleri üzerine etkisi büyüktür. Çünkü kompozit malzeme içerisinde matrisler tarafından yükün takviye elemanına iletilmesinde matris ile takviye elemanı arasındaki ara yüzey bağının da kuvvetli olması ve böylece malzemenin termodinamik dengesinin kurulması gerekmektedir [1]. Ara yüzey bağının kuvvetli olması ise bileşenlerin uyumuna ve matrisin ıslatabilirlik özelliğine bağlıdır. Bunun yanı sıra, üretim tekniği seçimi dışında takviye elemanlarının matris içerisinde homojen dağılımı, matris ve takviye elemanı çiftlerinin uygun seçimine bağlıdır. Bundan dolayı en uygun matris ve takviye çifti seçilmelidir [66].

MMK üretiminin esas amacı, matris alaşımının mukavemet ve elastik modülünü arttırmaktır. Matris alaşımları farklılığından dolayı değişik elastik modül, mukavemet ve termal genleşme katsayılı malzemeler üretilebilmektedir. En önemli özelliklerinden biri ise, aşınma dirençlerinin çok iyi olmasından dolayı, aşınma direnci gerektiren uygulamalarda yaygın olarak kullanılabilmesidir [67]. Değişik

malzeme sınıflarının çalışma sıcaklığı ve mukavemet/ağırlık oranlarına göre MMK'lerin performans haritaları Şekil 3.3'de özetlenmiştir [68].



Şekil 3.3. Değişik malzeme sınıflarının çalışma sıcaklıkları ve mukavemet/ağırlık oranlarına göre performans haritaları

MMK malzemeler, yukarıda sözü edilen yüksek dayanım ve düşük ağırlık oranı, geleneksel malzemelere göre güçlendirilmiş mekanik ve ısıl özellikler ve biçimlendirilebilmeleri gibi özellikleriyle çok çeşitli uygulamalarda çok fazla ilgi odağı olmaktadır. Uzay ve havacılık, taşımacılık (otomotiv ve demiryolu taşıtları), elektronik ve ısıl yönetim, güç iletimi, eğlence ve spor ürünleri, aşınma dirençli malzemeler gibi endüstriyel alanlarda giderek artan bir ilgiyle kullanılmaya devam etmektedir [1].

MMK'lar rijitlik, hafiflik, yakıt tasarrufu ve dolayısıyla çevreye daha az emisyon yayılması nedeniyle, özellikle otomotiv sektöründe çok yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Yüksek sıcaklıklarda çalışma, ısıl genleşme katsayısının düşük, yorulma direnci ve mekanik özelliklerinin çok iyi olmasından dolayı otomobillerin motor parçalarının (motor blokları, biyel kolu, piston, silindir kapağı, valf gövdesi,

eksoz parçaları vb.) yapılmasında, özellikle Al-Si alaşımı matrisli parçacık takviyeli kompozitler kullanılmaktadır. Havacılık ve uzay sanayisinde MMK'ların benzer uygulamalarını görmek mümkündür. Kompresör diskleri, pervaneler, vanalar, jet motoru rotorları ve füze kılavuz elemanları metal matrisli kompozitlerden başarılı olarak üretilmektedir. MMK'ların diğer mühendislik malzemelerine göre daha yüksek mekanik sönümlenme kabiliyetleri nedeniyle uzay mekiği yapımı için de çekici bir malzeme grubu olarak görülmektedir. Titanyum alaşımları daha yüksek sıcaklık direnci nedeniyle uçak motorlarında, özellikle kompresör pervanesi ve disklerinde kullanılmaktadır. Yakın gelecekte metal ve seramik esaslı kompozitlerin jet motorları ve uçak çerçevelerinin üretiminde geleneksel malzemelerin yerini alacağı sanılmaktadır. Diğer yandan spor ve eğlence sektörünü incelediğinde, tenis raketleri ve golf sopalarının yapımında SiC_p/Al kompozitlerin yoğun olarak kullanıldığı görülmektedir. Ayrıca, karbon elyaf takviyeli kompozitler ise, oltalar ve tenis raketleri yapımında tercih edilmektedir [1, 69].

MMK malzemelerde karbürler (SiC , B_4C), nitrürler (Si_3N_4 , AlN), oksitler (Al_2O_3 , SiO_2) ve elementel malzemeler (C, Si) takviye elemanları olarak kullanılırlar. Bu tür takviye elemanlarından SiC , Al ve Mg alaşımlarının tümünde takviye elemanları olarak kullanılmaktadır. MMK'larda matris içerisindeki homojen karışımdan emin olmak için; mekanik karıştırma, elektro manyetik veya gaz karıştırma ile metal-seramik birlikte karıştırılabilir. Özellikle de yarı katı karıştırma metodu, basınçlı döküm ve yeniden döküm işlemlerinde ilginç özellik gelişimleri görülmüştür. Ayrıca bu yöntemlerle metal-seramik parçacık arasındaki reaksiyonlar azalmaktadır [70]. MMK malzemeler bünyelerinde yer alan takviye fazlarının tiplerine göre:

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

beş farklı yapıda sınıflandırılmaktadır.

3.4.1. Parçacık takviyeli MMK

Parçacık Takviyeli Metal Matris Kompozit (PMMK) malzemelerde, homojen olarak dağılmış sert ve/veya gevrek malzeme yumuşak bir matrisle kuşatılmıştır [71]. PMMK'ler tek veya iki boyutlu makroskobik partiküllerin veya sıfır boyutlu olarak kabul edilen mikroskobik partiküllerin matris ile oluşturdukları malzemelerdir. En çok kullanılan parçacıklar ise Al_2O_3 , SiC, B_4C Si_3N_4 gibi seramiklerdir [72]. Parçacık maliyetinin fiber maliyetine göre oldukça düşük olması, PMMK malzemelerin uzun fiber takviyeli malzemelerden daha kolay üretilmelerini ve üretilen MMK malzemelerin daha izotropik bir yapıya sahip olmaları nedeniyle, son yıllarda yapılan çalışmalar bu tür kompozit malzemelerin geliştirilmesi üzerinde yoğunlaşmıştır [73].

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

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

gibi parametreler üzerinde durulması gerekir [72]. Bu nedenle, parçacık yüzeyine kaplama yapılması ve ısıtma işlemi uygulanması veya matris bileşiminin ayarlanması gibi metotlar uygulanmaktadır. Metal matrisli kompozitlerde ıslanabilirliği iyileştirebilmek için genellikle magnezyum elementi kullanılmaktadır. Bu şekilde kompozitin dayanımı:

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

bağlı olarak değişir [7].

Yapılan bir çalışmada %20 oranında SiC parçacığının, üretilen PMMK malzemenin akma ve çekme dayanımını yaklaşık olarak aynı oranda artırdığı, yoğunlukta fazla bir değişime neden olmadığı, ancak rijitlikte %50 bir artış sağladığı görülmüştür. SiC takviyeli PMMK malzemeler, aşınma direnci gerektiren uygulama alanlarında kullanım için büyük bir potansiyele sahiptirler. Parçacıklar, sertlik ve aşınma direncini önemli oranlarda iyileştirmektedir [64]. Örneğin; sementit karbürler veya sermetler metal matris içerisine dağılmış sert seramik parçacıklar içermektedir. Talaş kaldırma işlemlerinde kesici takım olarak kullanılan tungsten karbür takviyeli kompozitler, bu guruba tipik örnektir. Tungsten karbür (WC) aşırı derecede sert olup su verilmiş ve temperlenmiş çelikleri kesebilmektedir. Bu karbür, işleme sırasında toleransları dar tutabilecek kadar yüksek rijitliğe ve çok yüksek ergime sıcaklığına sahiptir. Bu yüzden hızlı işleme sırasında oluşan yüksek ısı, problem oluşturmamaktadır. Ne yazık ki tungsten karbürden yapılmış takımlar aşırı derecede kırılmalıdır. Tokluğu iyileştirmek için tungsten karbür parçacıkları, kobalt tozları ile karıştırılır [60].

3.4.2. Sürekli fiber takviyeli MMK

Sürekli fiber takviyeli MMK malzemeler, ön şekil verilmiş takviyelere veya tel dizinlerine sıvı emdirilmesi veya ön şekil verilmiş takviye-ana malzeme difüzyonu yoluyla üretilirler. Üretilmeleri otomasyonu zor olan birçok aşama gerektirir ve fiber maliyeti oldukça yüksektir. Boyutları ve şekli, standart mekanik işlemler ve mekanik yöntemlerle ikincil işlemlere uygun değildir veya sınırlıdır. Bu kompozitlerde, genellikle 0,1–250 µm çaplarında fiberler kullanılır. Karbon, bor, SiC ve Al₂O₃ sürekli fiber takviyeli kompozit malzemelerde kullanılan takviye elemanlarının en çok tercih edilenleridir [73].

Sürekli fiber takviyeli MMK malzemeler, takviye elemanına paralel yönde mükemmel mekanik özelliklere sahip olmalarına rağmen bu malzemelerin yüksek maliyeti yaygın olarak kullanılmalarını engellemektedir. Ayrıca, sürekli fiber takviyeli MMK'lar fiber eksenine dik yönlerde anizotropik özelliklere sahiptir.

Sürekli fiber takviyeli MMK malzemelerin kullanılmaları yüksek maliyetleri nedeniyle, çoğunlukla askeri ve çok özel amaçlı uygulamalarla sınırlandırılmıştır [5].

3.4.3. Kısa fiber takviyeli MMK

Bu tür MMK malzemelerde kullanılan takviye elemanları kısa fiberler veya kılcal kristallerdir. Kısa fiber olarak adlandırılan takviyeler, yaklaşık 3-5 μm çapında ve 0,5-6 mm uzunluğunda üretilirler [7]. Yapılarında hemen hemen kristal hataları olmayan kılcal kristallerin akma dayanımları teorik dayanımlarına yakındır [73]. Bu nedenle, yüksek dayanımlı süreksiz takviyeli MMK malzeme üretmek için kullanılmaktadır. Özellikle, kılcal kristalin yüksek sıcaklıktaki özellikleri diğer fiberlerden iyi olduğu için, kılcal kristallerle takviyeli MMK malzeme üretimi için çok sayıda çalışma yapılmıştır.

Sürekli fiberlere göre kısa fiber takviyeli kompozitlerde üretim işleminin hızlı, maliyetinin düşük ve şekil verme yeteneğinin yüksek olması nedeniyle tercih edilirler. Kılcal kristallerin çap-uzunluk oranlarının ($l/d \approx 50-100$) yük transferine müsaade etmesi de diğer avantajlarıdır. SiC kılcal kristal takviyeli alüminyum MMK malzemeler uzay araçlarında yaygın olarak kullanılmıştır. Bununla birlikte, kılcal kristallere olan bu yoğun ilgi, sağlıkla ilgili problemler oluşturduğu için azalmıştır [5].

3.4.4. Rasgele düzlemsel yönlendirilmiş (plaka) takviyeli MMK

Plaka takviyeli kompozitler basınçsız sinterleme, gaz basıncıyla sinterleme ve sıcak presleme olmak üzere üç yolla üretilmektedir. Son yıllarda seramik matrisli kompozitlerdeki gelişmeler (özellikle kılcal kristal takviyeli Al_2O_3 matrisli kompozitler) yüksek sıcaklıklarda mükemmel termomekanik özellikleri sayesinde yapısal uygulamalarda ve kesici takım yapımında kullanılmaktadır. Sağlık alanında kullanılan kesme aletlerinin modifikasyonu ve kayma özelliklerinin optimizasyonu için de üretilmeye başlamıştır [74]. Kılcal kristaller Al matris ile birleştirildiğinde çok iyi mekanik özellikler elde edilmesine rağmen, araştırmacılar, bükme testleri

uygulayarak bazı sonuçlar bulmuşlardır. Hacimce %30 SiC plaka takviyeli Al_2O_3 matrisli kompozitin 9 MPa, SiC kılcal kristal takviyeli kompozitin 6 MPa'da kırıldığı gözlenmiştir. Ayrıca plakalar, kılcal kristal gibi sağlık açısından tehlikeli olmaması, topaklanma problemi olmadan yüksek oranlarda matrise uygulanması ve el ile kolaylıkla yerleştirilebilmesi gibi nedenlerle daha fazla kullanılmaktadır [75].

3.4.5. Dağılım ile güçlendirilmiş MMK

Bu kompozitler, yüksek ısıl kararlılığa sahip mikrondan daha küçük çökeltiler veya parçacıkların metalik matris içinde homojen dağılmasıyla elde edilir. Bu parçacıkların çapı 0,01 μm ile 0,1 μm ve uzunluğu 50-200 μm arasındadır. Kullanılan parçacıkların hacim oranı %1-15 arasında değişir [7]. Yüksek oranda izotropik özellikler gösteren kompozit malzemelerdir. Metalik malzemelerin sertliklerini, aşınma dirençlerini, yüksek sıcaklıktaki mekanik özelliklerini geliştirmek için değişik türde oksit, karbür veya nitrür parçacıklarından faydalanılır. Tungsten karbür, titanyum karbür, krom karbür, bor karbür ve silisyum karbür gibi karbürlerin tipik özellikleri, yüksek sertlik ve aşınma dirençleridir. Parçacık boyutları, hacim oranları, parçacıklar arası mesafe, matris içerisindeki dağılım homojenliği, çözünürlükleri ve ısıl kararlılıkları kompozit malzemelerin özelliklerini belirleyen esas faktörlerdir [76].

Kompozit oluşturulması esnasında katılan partiküllerin boyutları ve hacim oranları arasındaki fark mekanik özellikleri de etkilemektedir. Dağılımla sertleştirilmiş alaşımlarda ikinci fazın etkisi dislokasyon hareketlerini engellemesi şeklindedir. Yapı içerisinde partiküllerin boyutu arttıkça kompozitin mukavemeti düşer. Parçacık boyutu parçacıklar arası mesafeyi belirlediğinden aynı hacim oranında parçacık boyutu küçük olursa parçacıklar dislokasyon hareketlerini daha etkili olarak kontrol edeceğinden, kompozitin dayanımı artar [76].

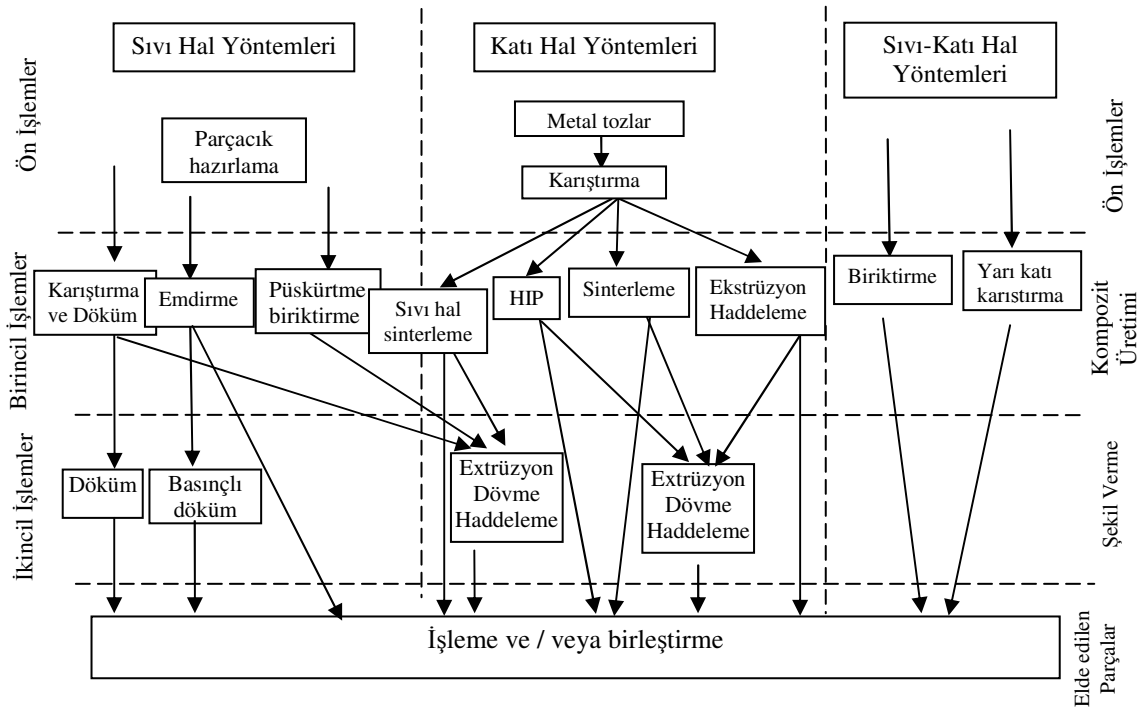
3.5. Metal Matrisli Kompozitlerin Üretim Yöntemleri

Metal matrisli kompozit (MMK) malzemelere üstün özellikler kazandırabilmenin yolu, üretimleri sırasında metal ve seramikler gibi farklı iki malzeme grubunun en iyi özelliklerini bir arada toplamaktan geçmektedir. Metaller çoğu zaman yüksek sıcaklıklarda dayanım ve tokluk özellikleri iyi fakat eğilip bükülmeye karşı göstermiş oldukları dayanım özellikleri düşük bir malzeme grubudur. Seramikler ise metallerin aksine eğilip bükülmeye karşı yüksek direnç gösteren, yüksek aşınma dayanımlı fakat darbe direnci düşük kırılmaya meyilli bir malzeme grubudur. Metal matrise, yüksek dayanımlı ve yüksek elastik modüllü seramik parçacıklar ilave edilerek elde edilen bir malzemenin mekanik özellikleri, genellikle bu iki malzemenin özelliklerinin ortalama bileşkesi olarak elde edilebilir [77].

MMK malzemelerin üretim yönteminin seçiminde ürün kalitesi ve maliyeti temel faktördür. Mekanik özelliklerin geliştirilmesi ve ekonomik bir üretim için etkin üretim yöntemleri geliştirmek bu alanda yapılan çalışmaların önemli bir kısmını teşkil etmektedir [78]. Bu amaçla çeşitli üretim yöntemleri geliştirilmiş olup MMK malzemelerin üretilmesinde kullanılan yöntemler üretim esnasındaki metal matrisin sıcaklığına göre gruplandırılabilir. Buna göre üretim yöntemleri:

- i) sıvı hal üretim yöntemleri,
- ii) katı hal üretim yöntemleri,
- iii) sıvı-katı hal üretim yöntemleri,

olarak üç sınıfa ayrılabilir (Şekil 3.4).



Şekil 3.4. MMK malzemelerin üretim yöntemleri [33]

3.5.1. Sıvı hal üretim yöntemleri

Sıvı hal üretim yöntemleri MMK malzemelerin üretilmesinde en ekonomik üretim yöntemi olarak görülmesine rağmen bir takım problemler içermektedir. Bunlar; seramik parçacıkların homojen olmayan dağılımı, aşırı ara yüzey reaksiyonları, parçacıkların matris içinde topaklanması, mekanik karıştırma esnasında parçacık kırılması ve takviye elemanı ile matris malzemesi arasındaki zayıf ıslanabilirliktir [5, 78]. Bu tür problemlerin yetersiz döküm teknolojisinden kaynaklandığı belirtilmiştir. Bunun yanında sıvı hal üretim yöntemlerinin maliyeti katı hal üretim yöntemlerinin maliyetinden daha düşüktür ve karmaşık şekilli parçaları son şekline yakın geometride elde edilebilmesine imkan sağlar [11]. Ayrıca, sıvı hal üretim teknikleri MMK malzemelerin üretilmesinde katı hal üretim tekniklerinden daha az zaman gerektirir [64]. Bu yüzden, PMMK malzemelerin sıvı hal yöntemleriyle üretilmesi, düşük maliyetleri nedeniyle, otomotiv parçaları üreticileri için maliyetleri düşürmede ve performansı artırmada iyi bir fırsat sunmaktadır [79].

Sıvı metal karıştırma yöntemi

Sıvı metal karıştırma üretim tekniği, sürekli olmayan fiber ve parçacıklarla takviyeli kompozitlerin imalatlarında MMK malzemelerin kabul görmüş, diğer üretim yöntemlerine nazaran oldukça ekonomik ve sayıca çok miktartlı üretimlere uygun bir yöntemdir [29]. Ayrıca bazı çalışmalar sıvı metal karıştırma yöntemi ile elde edilen kompozitlerin ürün maliyetinin, diğer metotlarla üretilen kompozitlerin ürün maliyetleri ile karşılaştırıldığında, 1/3 oranında daha az olduğunu ve hatta sayıca fazla üretimlerde ise bu oranın 1/10 gibi bir değere düştüğünü göstermiştir. Bu yöntemde SiC ve Al₂O₃ gibi seramik parçacıklar Al alaşımı sıvı haldeyken ilave edilir. Parçacıkların ilavesi esnasında ve ilave işlemi tamamlandıktan sonra belirli bir süre bir karıştırıcı ile mekanik olarak karıştırılır. Sıvı metal karıştırma yönteminde genelde mekanik karıştırma yöntemi kullanılmakla beraber, ultrasonik titreşimle birlikte piezo elektrik karıştırma yöntemi de kullanılmaktadır. Mekanik karıştırıcı olarak farklı form, geometri ve malzemeye sahip karıştırıcılar kullanılmaktadır. Karıştırıcı malzemesi genellikle matris fazı ile reaksiyona girmeyecek, yüksek sıcaklığa dayanımlı malzemelerden seçilmektedir. Karıştırıcılar genellikle, grafit, seramik esaslı ve kaplamalı veya kaplamasız ya da koruyucu katmanla boyalı dökme demir gibi malzemelerden imal edilmektedir [77].

Sıvı metal karıştırma yöntemi ile MMK malzemelerin üretimlerinde birkaç faktörün dikkate alınması gerekmektedir. Bu faktörler:

- Takviye fazının homojen dağılımının elde edilme zorluğu,
- Matris ve takviye fazı arasındaki ıslatabilirliğin zorluğu,
- Üretim sonrası elde edilen malzemede porozite oluşması,
- Genellikle yüksek sıcaklıklarda yapılan bir üretim yöntemi olduğu için matris ve takviye elemanları arasında temas yüzeylerinde kimyasal bir reaksiyonun meydana gelmesi

olarak sıralanabilir [77].

Seramik parçacıkların yoğunluğu çoğunlukla sıvı metalin yoğunluğundan fazla olduğu halde parçacıklar, ergimiş metalin yüksek yüzey enerjisinden dolayı, ergimiş metalle karışmayıp yüzeye çıkarlar ve bu problemi gidermek için parçacıklar üzerine bir karıştırıcı yardımıyla mekanik kuvvetlerin uygulanması gerekir. Sıvı metal sıcaklığı, karıştırma hızı, parçacık ilave etme hızı, karıştırıcı geometrisi ve parçacıkların sıvı metal içerisine karıştırılmadan önceki ısı işlemleri ısılanabilirliği iyileştirmede, en az hata ve gözeneklilikle iyi bir parçacık dağılımı sağlamada, parçacık topaklanmasında, inklüzyonların oluşumunda ve ara yüzey reaksiyonlarını belirlemede önemli faktörlerdir [77]. Araştırmacılar, karıştırma homojenliğinin ve ürün kalitesinin sağlanabilmesi için; matris ve takviye elemanlarının aynı sıcaklıkta karıştırılmalarını, karıştırıcı formunun ergimiş metalin yüzeyine yakın olarak karıştırmayı sağlayacak şekilde tasarlanmasını, karıştırıcının vorteks oluşturma şeklinin müsaade edilen formda olmasını, karıştırma hızının çok fazla yüksek olmaması gerektiğini ve karıştırma işleminin döküm işlemi öncesine kadar devam etmesi gerektiğini vurgulamışlardır [80, 81].

Günümüzde araştırmacılar tarafından matris fazının, takviye fazını ısıtmasını kolaylaştırmak amacıyla birçok uygulama yapılmıştır. Pratikte, ısıtmayı iyileştirmek için yapılan uygulamalar:

- Takviye elemanlarına metalik kaplamalar uygulama,
- Matris malzemesini reaktif elementlerle alaşımlama,
- Takviye elemanlarını ısı işlemlere tabi tutma,
- Ergimiş metale ultrasonik titreşim yaptırma

gibi işlemlerdir.

Döküm yolu ile üretilmiş kompozitlerin mekanik özelliklerinin belirlenmesinde etkin rol oynayan bir başka etken ise, ürün içerisinde yer alan porozitedir. Porozitenin yapı içerisindeki yüzdesi ve büyüklüğü önemlidir. Mekanik özelliklerin iyi olması için porozite oranının düşürülmesi gerekmektedir. Fakat döküm yolu ile üretimlerde porozite tamamıyla ortadan kaldırılamaz. Bu sebeple yapı içerisinde oluşan porozitenin azaltılmasında uygulanacak değişik işlemler mevcuttur. Bunlar:

- Vakum ile basınçlı döküm uygulama,
- Yoğun asal gaz ortamında üretimin gerçekleştirilmesi,
- Döküm işleminin basınçla yapılması,
- İkincil işlemlerle (presleme, çekme ve haddeleme gibi) yapıyı gözeneksizleştirme,
- Gaz giderici ilave alaşımlar kullanma,
- Parçacıkların ilave ve karıştırılması esnasında vakumla ortamdaki havanın boşaltılması

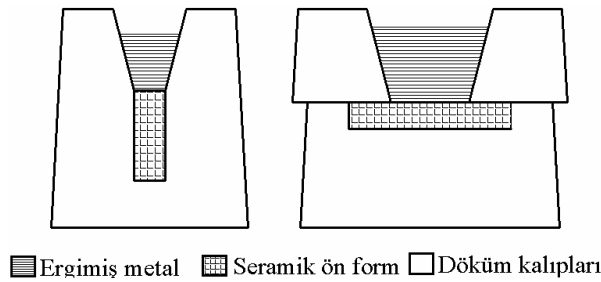
olarak sayılabilir. Bunlara ilaveten, ergimiş haldeki kompozit malzemeyi kalıba alım işleminde kalıp sıcaklığının arttırılması, dökümün kalitesini artıracığından, porozitenin azaltılmasına katkı sağlamaktadır [77].

Sıvı metal emdirme yöntemi

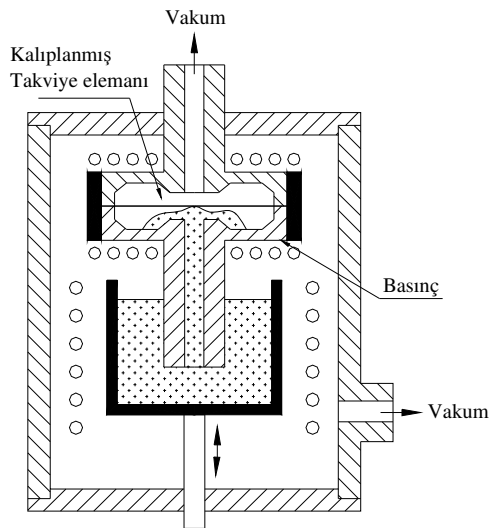
Metal matris kompozit malzemeleri üretmek için kullanılan alışılmış yöntemlerden birisi de önceden çeşitli şekillerde hazırlanan seramiklerin sıvı metale emdirilmesidir. Takviye elemanları genellikle parçacık, kılcal kristal ya da kısa veya uzun fiberlerden oluşmaktadır [24]. Genellikle, ön kalıp içersinde yer alan takviye elemanlarına, sıvı metalin emdirilmesiyle yapılan bir kompozit malzeme üretim tekniğidir. Bu yöntem, kısmi olarak bir bölgesinde (en az %30 civarında) ya da tamamıyla takviye elemanları ile güçlendirilecek kompozitlerin üretilmelerine olanak tanıyan bir uygulamadır [82, 83]. Matris ve takviye elemanını birleştirmek için gerekli olan basınç, özellikle takviye elemanının matris malzemesi tarafından ıslanabilirliğine bağlıdır. Bu yöntemde iyi bir ara yüzey devamlılığı sağlamak için uygulanan basıncın ergimiş metalin gözenekli seramik içerisine iyi bir şekilde infiltre olmasını sağlayacak yeterlilikte olması gereklidir. Basıncı belirleyen diğer faktörler; takviye elemanının oranı, morfolojisi ve ön kalıp sıcaklığıdır [84]. Ani darbeleri önlemek için, basınç hidrolik olarak kontrol edilir ve böylece ön şekiller zarar görmeden metale emdirilir. Emdirme işleminin tamamlanmasında, büzülme gözenekliliğini elimine etmek için, yüksek basınç uygulanabilir. Bu sağlamlaştırma

işlemi sayesinde gözenekliliğin olmaması, üretilen metal matris kompozitlere mükemmel mekanik özellikler kazandırmaktadır [33].

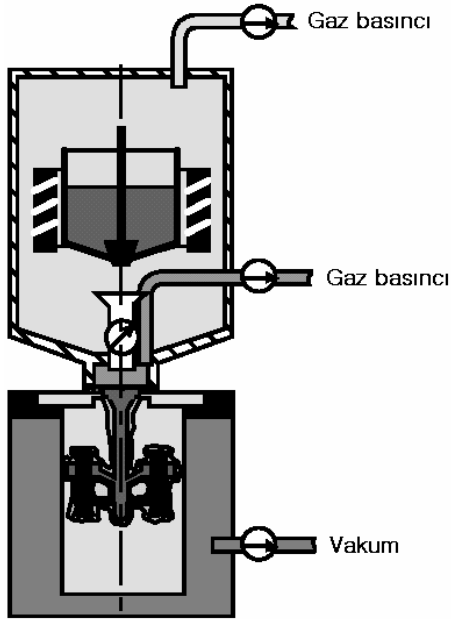
Ergimiş metal emdirme yönteminde, istenilen şekilde bir ara yüzey bağının oluşmasında, takviye elemanına uygulanan ısıtıl işlem ve uygulanan emdirme yönteminin önemi büyüktür. Bu kompozit üretim tekniğinde, farklı ergimiş metal emdirme yöntemleri kullanılmaktadır. Bunlar; ergimiş metalin yerçekimi ile kendiliğinden sızma özelliği ve gerekirse vakum desteği ile aşağı yönlü emdirme, yukarı yönlü kılcallık özelliği ve vakum ile emdirme, gaz ya da mekanik basınç uygulayarak ergimiş metal emdirme yöntemleridir. Şekil 3.5–Şekil 3.8 arasında bu yöntemlere ait, farklı araştırmacılar tarafından yapılmış çalışmalardan alınmış şemalar gösterilmektedir.



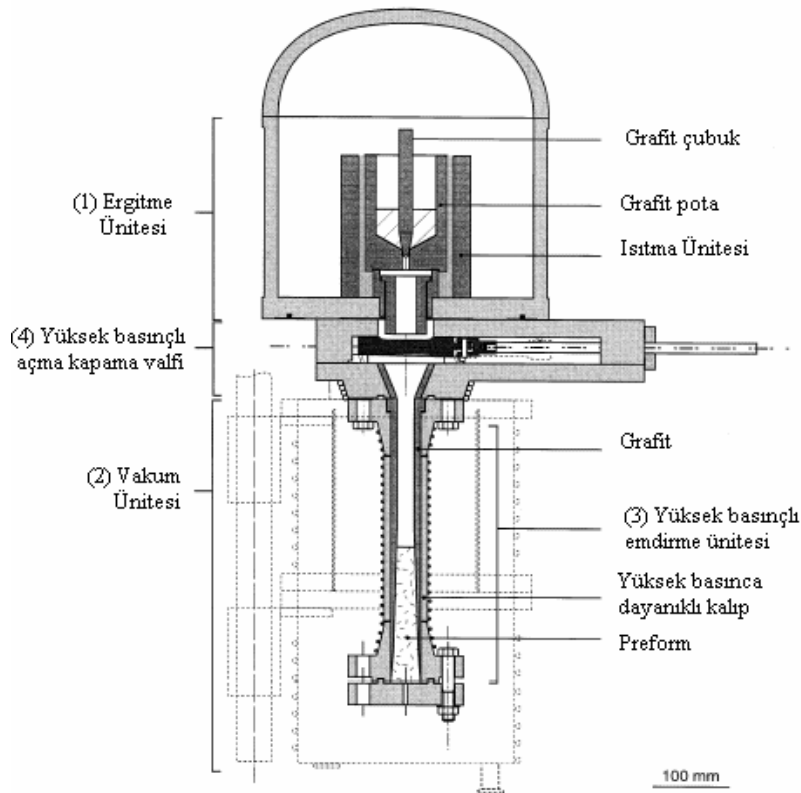
Şekil 3.5. Ergimiş metalin yerçekimi ile kendiliğinden sızma özelliği [83]



Şekil 3.6. Ergimiş metalin yukarı yönlü sızma özelliği ve vakum ile önceden kalıplanmış takviye elemanlarına emdirilmesi [82]



Şekil 3.7. Ergimiş metalin aşağı yönlü sızma özelliği ve gaz basıncı ile önceden hazırlanmış takviye elemanlı kalıba emdirilmesi [85]



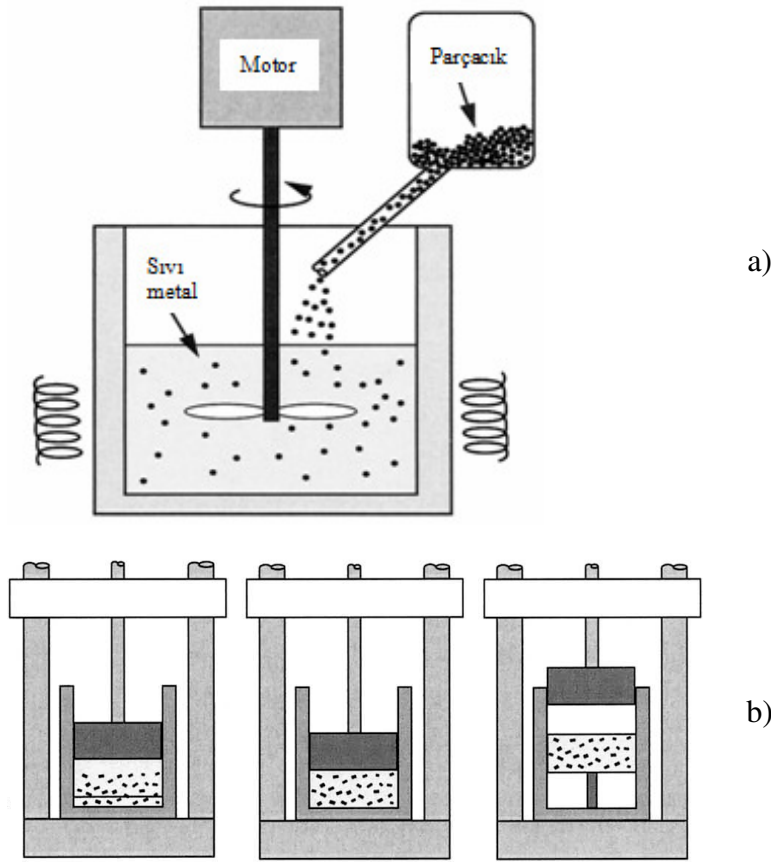
Şekil 3.8. Mekanik basınçla ergimiş metalin ön form verilmiş takviye elemanlı kalıba emdirilme işlemi [21]

Sıvı metal emdirme yönteminin dezavantajlı yönleri de vardır. Bunlardan birisi parçacıklarla takviyeli kompozitlerin üretiminde düşük seviyelerde parçacık hacim oranıyla çalışılamıyor olmasıdır. Ayrıca 50-100 MPa civarında bir basınç ile sıvı metalin emdiriliyor olması nedeniyle karmaşık ve dayanımlı bir üretim ünitesine sahip olunması gerekmektedir. Bu dezavantajların yanında sürekli fiber takviyeli metal esaslı kompozitlerin üretilmesinde kullanılabilecek en uygun yöntemdir [21].

Sıvı metal karıştırma - basınçlı döküm yöntemi

Bu yöntemde, sıvı metal-takviye elemanı karışımının kalıp içerisine dökülmesine kadar uygulanan işlemler sıvı metal karıştırma yöntemi ile aynıdır. Bu yöntemin sıvı metal karıştırma yönteminden farkı, sıvı metal-takviye elemanı karışımına mekanik bir araçla belirli miktarda basınç uygulanmasıdır. Basınç sayesinde, sıvı metal takviye elemanı karışımının kalıp duvarları ile daha iyi teması sonucunda, hızlı bir soğuma gerçekleşir. Sonuç olarak, daha ince mikroyapı, daha az gözenek ve ara yüzey reaksiyonları meydana gelmektedir [78, 86]. Ayrıca, uygulanan basınç yardımıyla matris ve takviye elemanı arasındaki ıslanabilirlik ve bağ kuvveti artmaktadır. Uygulanan basıncın miktarı, MMK malzemenin mekanik özelliklerini belirlemede önemli bir rol oynar. Bu yöntem, genel uygulamalar için, düşük maliyetli kompozit malzeme üretiminde büyük bir potansiyele sahiptir [11, 73].

Ergimiş matris malzemesinin içerisine katılan, ergime derecesi oldukça yüksek olan takviye elemanlarının, karışımın akıcılığını azalttığı ve başarılı bir şekilde döküm işlemini zorlaştırdığı dikkate alındığında, basınç uygulayarak döküm yapma işleminin önemi ortaya çıkmaktadır [78]. Uygulanan basınç sayesinde, karışım kalıp hacmini rahatlıkla doldurabilir ve kalıbın tam şeklini alır. Şekil 3.9’da sıvı metal karıştırma-basınçlı döküm yöntemi şematik olarak gösterilmiştir [1].



Şekil 3.9. Sıvı metal karıştırma-basınçlı döküm yöntemi [1]

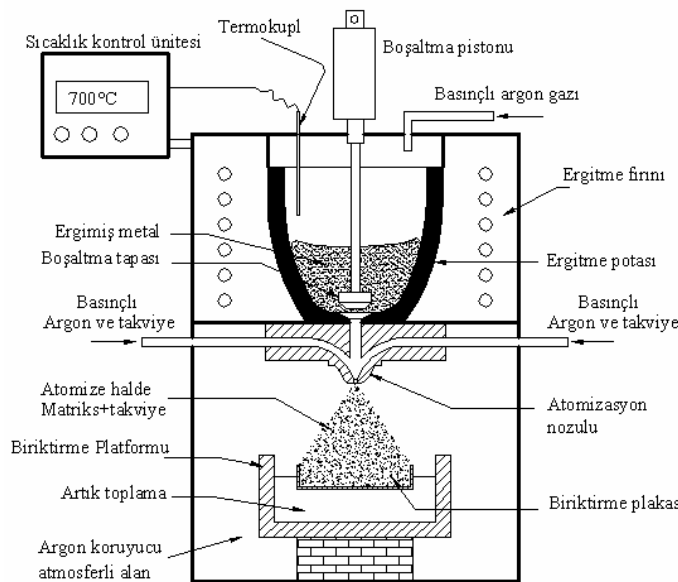
- a) Sıvı metal-takviye elemanı karıştırma ünitesi
b) Kalıba dökülen karışıma basınç uygulanması

Püskürtme biriktirme

Püskürtme biriktirme yöntemi, sıvı metalin asal gazlar yardımıyla bir nozul içerisinden basınçla geçirilerek, belirli uzaklıkta bulunan ve eksenel hareket ettirilebilen bir biçime biriktirilmesinden ibarettir. Bu biçim genellikle önceden hazırlanmış sürekli elyaflardan oluşmaktadır. Bu yöntemde, parçacık takviyeli kompozitlerin üretimi için püskürtülecek metal, indüksiyon fırınında ergitilir ve potaya basınç uygulanır. Ergimiş metal pota tabanından nozul ile püskürtülürken, aynı zamanda parçacıklar atomize edilmiş sıvı gaz içerisine asal gazlarla enjekte edilerek, önceden ısıtılmış alt katman üzerine çökeltir ve toplayıcı üzerinde katı bir çökelti oluşur [87]. Püskürtülen yüzeyde oluşan bu çökelti hızlı bir şekilde soğutulur. Bu hızlı soğuma sonucu reaksiyon zamanı kısa olur ve dolayısıyla zararlı

reaksiyonlar azaltılmış olur. Soğuduktan sonra elde edilen form haddelenmek üzere toplayıcıdan çıkartılır. Bu yöntem, önceleri, sürekli elyaf takviyeli kompozit malzemelerin üretiminde kullanılmıştır. Çeşitli blok, tüp vb. ön kalıplama şekilleri bu metotla üretilir [73]. Püskürtme biriktirme metotları; önemli gözeneklilik katmanları, düşük oksit muhtevası ve hızlı katılaşması gibi özellikleri ile ayırt edilmektedir. Bu yöntemde biriken parçacıklar ile malzeme arasında tam olarak yoğunluk elde etmek için bir sonraki işlem ile birleştirilmektedir [88].

Katılaşma oranı oldukça hızlı gerçekleştiğinden ince taneli, düzgün bir mikroyapı elde edilebilmektedir. Ayrıca parçacıklar arası mesafenin kontrol edilebilmesi ve parçacıkların daha kolay yönlendirilmeleri diğer bir üstünlüğüdür. Maliyet açısından düşünüldüğünde, toz metalurjisi yönteminden ucuz, sıvı metal karıştırma-basınçlı döküm yöntemine göre pahalı bir tekniktir. Bir dezavantajlı yanı da, sadece parçacık ve partikül takviyeli kompozitler için uygulanabilir bir üretim yöntemi olmasıdır [4]. Bu metot, alüminyum gibi ergime sıcaklığı nispeten düşük olan metallere uygulanmaktadır. Şekil 3.10'da püskürtme biriktirme döküm yöntemi şematik olarak görülmektedir.



Şekil 3.10. Püskürtme biriktirmeli döküm ünitesinin şematik görünüşü [87]

Reaksiyon yöntemi

Reaksiyon yöntemi; matris ve takviye elemanı arasındaki ıslanabilirliği iyileştirmek, zararlı ara yüzey reaksiyonlarını elimine etmek ve maliyeti düşürmek için uygulanan bir yöntem olup [89] MMK malzemenin takviye elemanı parçacıkları, sıvı-katı-gaz reaksiyonu sonucu oluşur [90]. Bu yöntemde, katı ve gaz bileşikler ergimiş matris içerisine katılır ve takviye fazı; matris malzemesi, matris malzemesinin içerisindeki alaşımlar ve ilave edilen bileşiklerin reaksiyonları sonucu oluşur. Takviye elemanlarının morfolojilerinin kontrol edilebilmesi, parçacık-matris ara yüzeyinin temizliği ve reaksiyon sonucu oluşan takviye elemanı ile matris malzemesi arasındaki uyumluluk bu yöntemin avantajları arasındadır [91].

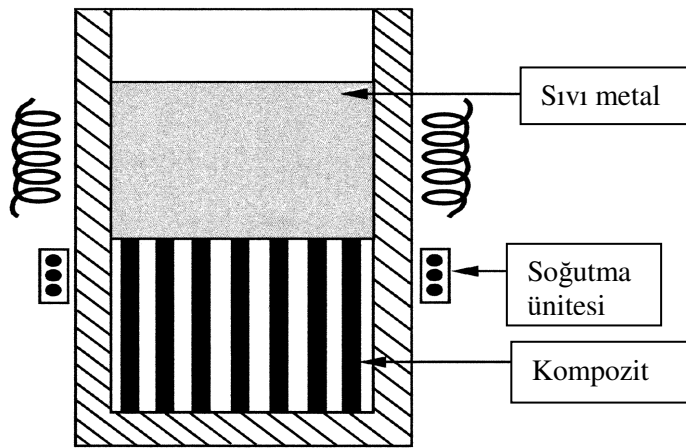
Matris fazı içerisinde termodinamik olarak dengede olan, parçacık boyutu ve hacim içeriğinin belirlenmesine izin veren bir kompozit malzeme üretim yöntemidir. Takviye elemanlarının denge halinde oluşturulabilmesi için, ergimiş matrise dışarıdan katı-sıvı formlarından herhangi birinden alaşımlayıcı katkı maddelerinin ilavesi söz konusudur (Şekil 3.11). Ergiyik içerisinde oluşacak takviye fazlarının, genellikle karbür ya da oksit içerikli seramik parçacıklar halinde oluşması sağlanır. Aynı zamanda bu ikincil seramik esaslı fazların yapı içerisinde homojen bir dağılım sergilemesi gerekmektedir. Denge halindeki takviye elemanlarının oluşması matris içerisindeki alaşım elementlerine ve miktarına bağlı olduğu için, bu yöntem her türlü matris alaşımına uygulanamaz. Bu yöntemin avantajları aşağıdaki şekilde özetlenebilir:

- Takviye elemanları termodinamik yönden dengededir ve yapı sıcaklık değişimlerinden etkilenmez.
- Takviye form kontrolü yapılabilir ve aynı zamanda farklı kimyasal ya da fiziksel özelliğe sahip takviye elemanları aynı ortamda oluşturulabilir.
- Takviye elemanlarının şekli ve boyutları kontrol edilebilir.
- Metalik ya da intermetalik malzemelere uygulanabilir.
- İstenilen hacim oranında takviye elemanı ilave edilebilir.

- Elde edilen kütük haldeki kompozit malzemeler klasik metalürji yöntemi ile (haddeleme, çubuk çekme v.b.) tekrar şekillendirilebilir.

Bu yöntemin dezavantajları ise şöyle sıralanabilir:

- Çok detaylı bir teorik hesap gerektirmektedir.
- Matris ve alaşım katkıları rasgele seçilemez.
- Üretim maliyeti yüksektir.
- Reaksiyon sonucu elde edilen parçacıkların hacim oranı ve büyüklüğünün kontrolü zordur.
- Parametrelere çok duyarlı bir üretim metodudur.



Şekil 3.11. Reaksiyon yönteminin şematik gösterimi [1]

3.5.2. Katı hal üretim yöntemleri

Çoğunlukla parçacık takviyeli kompozit malzemelerin toz metalurjisi metoduyla üretilmesinde kullanılan yöntemleri ihtiva eder. Matris ve takviye elamanı parçacıklarının karıştırılması, preslenmesi ve sinterlenmesi gibi bir takım işlemleri gerektirdiği için maliyeti artırmakla birlikte sıvı metal karıştırma yöntemiyle karşılaştırdığında, bu yöntemlerle mekanik özellikleri daha iyi kompozit malzemeler üretilir [1]. Sıvı hal üretim yöntemleri ile kıyaslandıklarında:

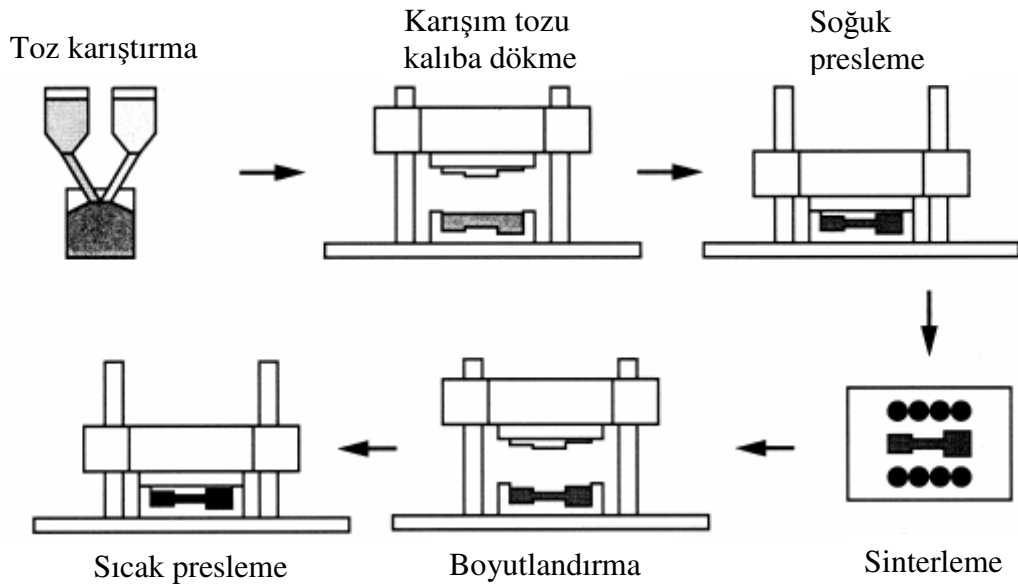
- Genelde, düşük sıcaklıklarda üretimin gerçekleştiriliyor olması nedeniyle, özellikleri kötü yönde etkileyici reaksiyon oluşumu düşüktür,

- Belirli formlarda malzeme üretimine olanak sağlamaktadır,
- Üretilen kompozit malzemeler mekanik özellikleri bakımından kıyaslandığında, sıvı hal üretim yöntemlerine göre daha iyi fakat dövme malzemelere nazaran kötü bir dayanıma sahiptirler.
- Sıvı üretim yöntemlerine kıyasla daha pahalı bir üretim şeklidir.

Toz metalurjisi yöntemi

Takviye malzemesinin sıvı alaşım tarafından ıslatabilirliğinin düşük olması nedeniyle, ilk olarak geliştirilen üretim yöntemi, Toz Metalurjisi (TM) yöntemidir [92]. TM yöntemi, ilk olarak geleneksel döküm, sıcak ve/veya soğuk presleme ve talaş kaldırma yöntemlerine alternatif olarak geliştirilmiştir. TM, son şekle yakın geometride üretim süreçleri olarak; sinterleme, sıcak presleme, sıcak izostatik presleme, toz metal enjeksiyonu, nano-parçacık teknikleri, mekanik alaşımlama gibi konularla sürekli büyüyen bir pazara hitap eden, çok karmaşık şekilli ürünlerin elde edilmesinde uygulanan yüksek teknolojilerden birisidir. Ayrıca volfram, titanyum, tantal ve bu malzemelerin karbürleri ile birlikte nikel, demir, kobalt gibi metallerden kompozit şeklinde üretimlerinde; çok sert, üstün mukavemet, aşınma ve korozyon dayanımı yüksek, üstün fiziksel ve mekanik özellikte malzemelerin üretiminde kullanılır. Farklı boyut, şekil ve paketlenme özelliğine sahip metal tozlarını sağlam, hassas ve yüksek performanslı parçalara dönüştürülmesi ve bu sürecin ekonomik olarak sağlanması TM yöntemini cazip hale getirmiştir. Ayrıca, sahip olunan bu özellikler ile TM; verimlilik, enerji ve hammadde gibi günümüz gereksinimlerini karşılar. Bunların sonucu olarak, TM konusu sürekli gelişmekte ve geleneksel metal şekillendirme operasyonlarına alternatif oluşturmaktadır [3, 31]. Ayrıca, TM yöntemiyle üretilen parçaların genelde sıvı hal üretim yöntemiyle üretilmiş parçalardan daha iyi mekanik özelliklere sahip oldukları bilinmektedir. Düşük sıcaklıklarda çalışılması, takviye elemanının homojen dağılımının sağlanabilmesi, kompozit yapının kontrolünün mümkün olması, takviye elemanlarının daha ucuz olması gibi nedenlerden dolayı özellikle parçacık takviyeli metal matrisli kompozitlerin üretiminde TM yöntemi tercih edilmektedir [92].

TM üretim basamakları; imal edilecek parçanın karmaşıklığı, dayanım özellikleri ve içermesi gereken alaşım tozlarına göre değişiklik göstermektedir. En karmaşık ve dayanım özellikleri bakımından en iyi özellikleri elde etmek amacıyla uygulanması gereken başlıca TM parça üretim basamakları; tozların karıştırılması, karışım tozların kalıba konulması, soğuk presleme, sinterleme, boyutlandırma ve sıcak presleme olarak sıralanabilir (Şekil 3.12).



Şekil 3.12. Toz metalurjisi ürünlerinin üretim basamakları [1]

TM yönteminde, uzun fiber veya partikül şeklindeki takviye malzemesi ile metal tozlar karıştırılır. Karıştırma sonrası elde edilen karışım kalıba doldurulur. Daha sonra tozlar soğuk veya sıcak presleme ile kalıplanır. Soğuk presleme sonrası kalıplanmış ürün, partikül ve matris tozu arasındaki mukavemetin artırılması amacıyla sinterlenir. Karıştırma işleminden sonra soğuk presleme yerine sıcak presleme de kullanılabilir. Sıcak İzostatik Presleme (HIP) kullanımıyla, soğuk preslemeye nazaran daha yüksek yoğunluğa sahip kompozit malzemeler üretilebilir. Sıcak ve soğuk presleme sonrası mukavemet kazanmış olan ara ürün; ekstrüzyon, dövme ve haddeleme gibi işlemlerle şekillendirilebilirler. Sinterleme ile %80-90 teorik yoğunluğa ulaşılabilir. Karıştırma sonrası elde edilen ürünün teorik yoğunluğunun elde edilmesi ve ürün mukavemetinin artırılması amacıyla Soğuk İzostatik Presleme (CIP)/HIP ya da sinterlemeyi takiben ekstrüzyon uygulanır [92].

Difüzyonlu birleştirme yöntemi

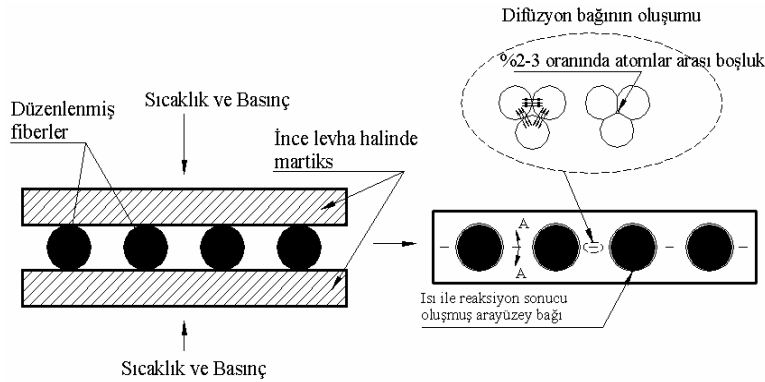
Difüzyon bağı oluşturarak kompozit malzeme üretimi, matris malzemesi olarak çok geniş bir yelpazeye sahip olup aynı zamanda fiber konumu ve hacim oranı kolaylıkla kontrol edilebilen bir katı hal üretim tekniğidir [1]. Bu metotla metal matrisli kompozitler, metal levha veya istenilen karmaşık biçimlerde üretilebilir. Genel olarak üretim süreci; ince metal plakalar üzerine tek kademeli fiberlerin istenilen açıda ve hacimde yerleştirilmesi, bu işlem tamamlandıktan sonra ergime sıcaklığına yakın bir sıcaklıkta izostatik presleme veya haddelemeyle metal-metal temasın sağlanması ve metal plaka temas noktalarında difüzyon bağı oluşarak paketlenmiş halde kompozit malzemelerin üretilmesi şeklindedir [7]. Bu yöntemin olumsuz yanları ise; malzeme üretim sürecinin uzun olması, yüksek sıcaklık ve basınçlar gerektirmesi nedeniyle maliyetin fazla olmasıdır [1]. Difüzyonlu birleştirme yöntemi iki farklı uygulamayla yapılabilmektedir. Bunlar;

- Sabit sıcaklık ve basınç altında (izostatik) presleme,
- Sıcak ve soğuk haddeleme

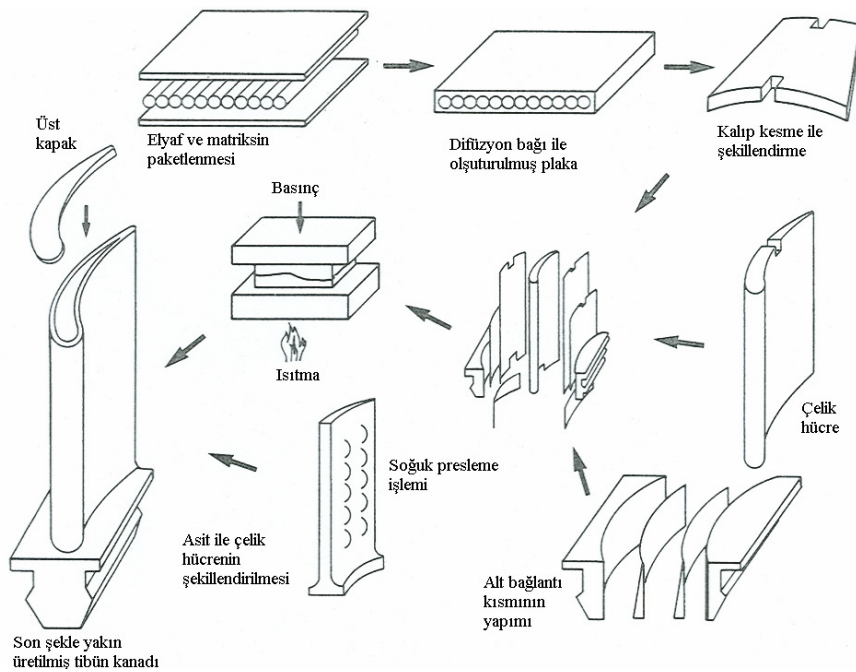
ile difüzyonlu birleştirme işlemleridir.

Sabit sıcaklık ve basınç altında (izostatik) presleme

Sabit sıcaklık ve basınç altında yapılan üretim ile karmaşık form özelliklerine sahip parçalar rahatlıkla ve düşük maliyette üretilebilmektedir. Yüksek ergime sıcaklığına sahip matrislerin kompozit hale getirilmeleri bu yöntem ile daha kolaydır. Şekil 3.13’de bu işlemin üretim süreci şematik olarak verilmiş olup, Şekil 3.14’de ise uçak motoru tribün kanatçığının bu yöntem ile üretim basamakları gösterilmiştir.



Şekil 3.13. Sabit sıcaklık ve basınç altında difüzyonlu birleştirme işlemi [8]



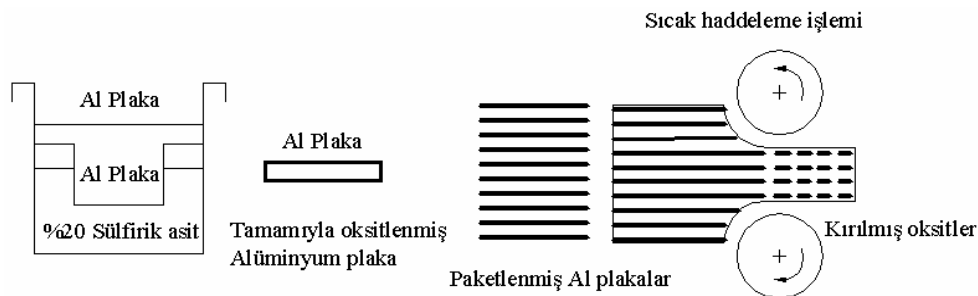
Şekil 3.14. Uçak motoru tribün kanatçığı üretim işlem basamakları [8]

Bu işlemde ince metal levhalar ve fiberlerin yüzeylerinin çok temiz ve oksitsiz olması gerekir. Eğer bu sağlanmazsa, matris plakalar arasında bir difüzyon bağı oluşturulamaz ve kompozitin dayanımı da düşük olur. Matris–matris temas noktalarında difüzyon bağı oluşurken yine matris–fiberler arasında da sıcaklığın etkisindeki reaksiyonla ara yüzey bağı oluşur. Ancak, kompozitin mekanik özelliklerini doğrudan etkileyen bağ, matris–matris arası difüzyon bağıdır ve bunun en iyi şekilde gerçekleşmiş olması gerekmektedir. İşlem basamaklarını eksiksiz olarak yerine getirebilmek için genellikle fiberlerin yüzeyi plazma püskürtme ve iyon

kaplama yöntemleriyle çeşitli kaplama metalleri ile kaplanır. Difüzyon bağı oluşturma işleminde, sıvı halde üretim tekniğinde karşılaşılan problemlerden biri olan fiberlerin bozulması veya ayrışması problemine, sıvı halde üretim tekniğine göre daha düşük sıcaklıklarda üretildikleri için pek rastlanmaz. Fakat, difüzyonlu birleştirmede ürün içerisindeki temas bölgelerinde, Şekil 3.13’de gösterildiği gibi, bir boşluğun oluşması kaçınılmazdır. Bu yüzden, bu tür kompozitlerde %2 ila %3 oranında boşluklar oluşmaktadır. Bu da kompozitin mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkilemektedir [93].

Sıcak ve soğuk haddeleme

Sabit sıcaklık ve basınçta difüzyon bağı oluşturma yöntemi ile benzerlik göstermekle beraber bu yöntem ile sadece plaka halinde kompozit malzemeler elde edilebilmekte, karmaşık şekilli parçaların imalatı yapılamamaktadır. İşlem basamakları; ince levha halindeki metal plakaların uygun işlem ile oksitlendirilmesi, uygun formda paketlenmesi ve sonrasında sıcak ve soğuk haddeleme işlemleri ile plaka haline getirilmelerinden oluşmaktadır. Bu yöntemle plaka halinde kompozit malzeme üretiminin diğer sıvı ve katı yöntemlere nazaran daha ekonomik olduğu belirtilmiştir. Ayrıca bu yöntemle, istenilen hacim oranlarında kompozit üretiminin başarıyla gerçekleştirilebileceği belirtilmiştir. Bu yöntemin diğer difüzyonlu birleştirme yöntemine göre avantajı, takviye elemanlarının süreksiz olarak uygulanabilmesidir [93]. Kompozitlerin üretimlerinde kullanılan işlem basamakları Şekil 3.15’de görülmektedir.



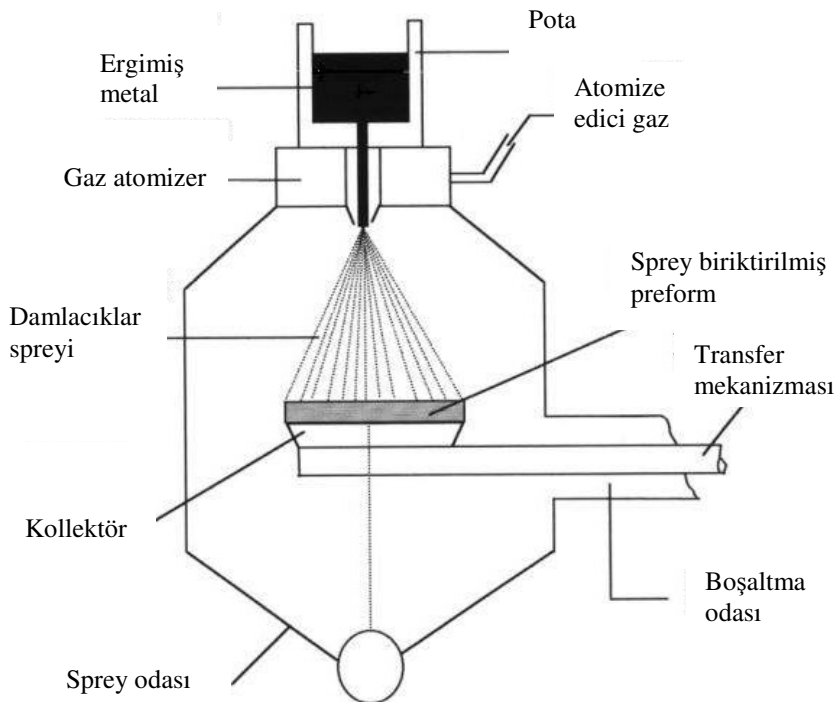
Şekil 3.15. Sıcak ve soğuk haddeleme ile kompozit üretim işlem basamakları [93]

3.5.3. Sıvı-Katı hal üretim yöntemleri

Sıvı-katı hal üretim yöntemleri, yarı-katı metal şekillendirme işlemleri olup genellikle döküm ve dövme işlemlerinin kombine olarak bir arada yapıldığı karma üretim yöntemleridir [94]. Bu yöntemler, rheo-döküm (reocasting), kompo-döküm (compocasting), tiksodöküm (thixocasting) gibi çeşitli isimlerle bilinmektedir. Genellikle, alaşımların katılaşma esnasında karıştırılması ile dendritik olmayan sıvı-katı halde malzeme üretilmesi ve bu malzemenin dökümü ya da sıvı metal gibi doğrudan bir kalıba enjekte edilmesi şeklinde yapılmaktadır [95]. Ayrıca ergiyik haldeki metalin püskürtülerek biriktirilmesi olarak bilinen osprey biriktirme sıvı-katı hal üretim yöntemleri içerisinde değerlendirilmektedir [96].

Osprey biriktirme yöntemi

Osprey işleminde, takviye elemanları ergimiş metal içerisine, sıvı metalin akış yönünde olacak şekilde, bir asal gaz yardımıyla püskürtülerek atomizasyon işlemi gerçekleştirilir [5]. İngiltere’de Osprey Metals Ltd. Şirketi tarafından geliştirilen ve şirketin adıyla anılan Osprey işlemi, şematik olarak Şekil 3.16’da gösterilmiştir.



Şekil 3.16. Osprey yönteminin şematik gösterimi [97]

Alaşım, sprey hücresinin en üstünde bulunan pota içerisinde, indüksiyonla ergitilir. Eriyen alaşım, potanın altında bulunan refrakter püskürtücünün içine geçer. Burada 0,6-1 MPa basınçta, azot veya argon gazı tarafından atomize edilerek üretilen damlacıklar, püskürtülerek bir kolektör üzerinde toplanır. Atomize edici gaz, püskürtülme esnasında damlacıklardan önemli oranda ısıyı uzaklaştırarak, onların soğumasına yardımcı olur. Soğutulan damlacıklar toplayıcı üzerine gelerek burada birikir ve yoğun bir birikim oluşturur [78]. Osprey işlemi mevcut ön haddelenmiş malzemenin dövülmesi ve toz metalurji gibi iki temel üretim metoduna alternatif oluşturmuştur. İlk metot ergitme, ingot halinde döküm, çubuk şeklinde haddeleme, kesme, yeniden ısıtma ve dövme işlemlerini içerir. Bu metot malzemelerin dövülerek üretilmesinde kullanılan en yaygın üretim biçimidir. Ancak bu yöntem çok fazla hurda ürettiği için pahalıdır. Toz metalurji yöntemi de atomizasyon, eleme, karıştırma, gaz giderme, birleştirme, ısıtma ve dövme gibi birçok işlem basamağı içerdiğinden pahalı bir yöntemdir. Osprey işlemi ekonomik ve teknik açıdan dövme endüstrisine çok önemli katkılar sağladığı için, yöntemi geliştiren kişi “R.G.Brooks” iki patent ile ödüllendirilmiştir [97].

Yarı katı karıştırma yöntemi

1970 yılından bu yana MMK’lerin üretilmesinde kullanılan bu yöntem değişik isimler ile adlandırılmaktadır. Sıvı metal karıştırma yöntemindeki ıslanabilirlik problemini çözmek için geliştirilen döküm yöntemlerinden biridir [98]. *Rheocasting* ve *Compocasting* olarak bilinen döküm yöntemleri kısa fiber veya partikül takviyeli metal matrisli kompozit malzemeler için uygulanan yöntemlerin en ekonomiklerinden biridir. Bu yöntemde, ilk olarak matris malzemesi karıştırma üniteli bir ergitme fırınının içine yerleştirilip ergime sıcaklığının 40-50 °C üzerinde ısıtılmakta, sıcaklık homojenize edilmekte ve sıvı metal sıcaklığı kontrollü olarak düşürülmektedir. Alaşım %40-50 katı hale geldiğinde matris malzemesinin içine takviye malzemesi eklenmeye başlamaktadır. Takviyenin ilavesi esnasında sıcaklık yükseltilmeye başlamakta ve takviyenin tamamı iyi şekilde ıslatılınca kadar sıcaklık arttırılarak karıştırma işlemi devam etmektedir. Nispeten düşük viskoziteye sahip karışım doğrudan basit kütük şeklinde dökülebilir, bu durumda yöntem

"Rheocasting" adını almakta eğer karışım ergime sıcaklığı üzerinde karıştırılarak döküm gerçekleştirilirse "Compocasting" adı verilmektedir. Karışımın yarı katı olması, karıştırma esnasında parçacık ilavesini kolaylaştırır [98, 99]. Seramik parçacıkların topaklanma eğilimi, karışım içinde bulunan katı faz yardımıyla engellenir ve parçacıklar katı fazlar arasında mekanik olarak tutulur. Daha sonra sıvı matrisle etkileşime girerek bağ oluşturur. Ayrıca, mekanik karıştırma sonucu oluşan sürekli deformasyon sonucunda, katı fazların kırılmasıyla parçacıkların topaklanması engellenir [11, 98].

4. TOZ METALURJİSİ

4.1. Toz Metalurjisi Teknolojisinin Özellikleri

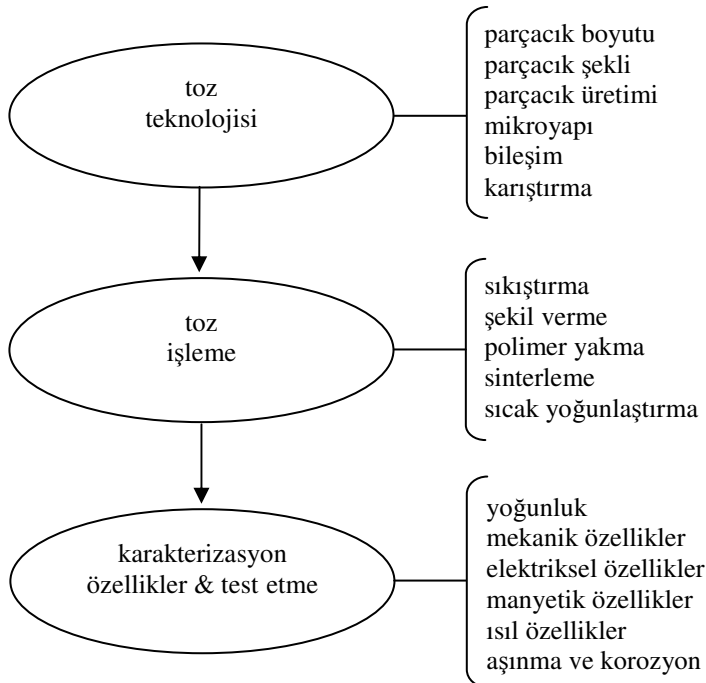
Toz metalurjisi (TM), tozların birtakım işlemlerden geçirilerek yararlı mühendislik parçalarına dönüştürülmesi ile ilgilenmektedir [99]. Parçaların değişik tozlardan elde edildiği bir üretim teknolojisidir. Toz metalurjisi işlemleri toz haldeki metaller, seramikler, parçacık takviyeli kompozitler hatta plastik kalıplama ve metal dövme gibi birçok tekniğin sentezlenmesinden oluşan bir üretim yöntemidir [8]. Çeşitli metal işleme teknolojileri arasında en farklı üretim yöntemi olan toz metalurjisi, ergitme metalurjisi ile karşılaştırmalı olarak açıklanabilmektedir. Ergitme metalürjisinde, bir metal veya alaşım eritilmekte ve bir kalıp içerisine dökülmektedir. Burada esas olan, kalıbın istenilen ürünün şeklinde olması ve bir dökme işlemi uygulanarak külçe şeklinde ürünün ortaya çıkarılmasıdır. Külçe, daha sonra haddeleme, dövme, çekme, ekstrüzyon, talaşlı imalat vb. yöntemlerle şekillendirilmektedir [100].

Toz metalurjisi, malzeme ve enerji tasarrufu sağlaması ile geleneksel malzemelerin yerini alacak malzemelerinin üretilmesinde kullanılan bir teknik olması bakımından kütle üretim yöntemleri arasında yer almaktadır [100]. Çok eski çağlardaki bilginler tarafından demirin eritilerek dökülmesi yöntemi gibi uygulanmıştır. Mısırlılar milattan önce 3000’li yıllardan beri toz metalurjisini kullanarak demir aletler yapmışlardır. İnkalar, değerli metal tozlardan mücevher ve sanat eserlerini imal etmişlerdir. İlk modern TM ürünü 1900’lü yılların başlarında geliştirilen ampulün içindeki ince tungsten teldir. Bu süreç, 1930’lu yıllarda karbür kesici takım malzemeleri, 1960-70’li yıllarda otomobil parçaları, 1980’li yıllarda uçak türbin motor parçalarının imalatı ile devam etmiştir [101].

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

konvertörler, darbe emiciler, bujiler, piston kolları, zincir dişlisi ve pek çok motor zamanlama parçaları. Bu alanda daha çok üretilebilirlik, otomasyon ve boyut toleransı düşünceleri hakimdir. Toz metalürjisi ürünlerinin kullanılması için pek çok üstün özellik ve mikroyapısal uygunluk olması ikincisidir. Gözenekli filtreler, oksit dağılımlı güçlendirilmiş türbin alaşımları, sermetler, fonksiyonel tabakalı yapay kemikler, temas alaşımları (bakır-krom) ve tungsten karbürden veya elmas kompozitlerden sert kesici takımlar bunlara örnek olarak verilebilir.

Üçüncü olarak da, havacılık ve savunma sanayinde hafif ve dayanıklı malzemelere olan ihtiyaç, TM ile üretilen Metal Matrisli Kompozit (MMK) malzemelere olan ilginin son on yılda katlanarak artmasına sebep olmuştur. Çalışmalar ve elde edilen deneyimler, yüksek sıcaklık dayanımının yapıdaki çökelti yerine, ince dağılımlı parçacıklarla sağlandığını göstermiştir. Ancak bu yapıyı geleneksel döküm yöntemiyle elde etmek mümkün olmamaktadır. Takviye parçacığının boyutu, hacimsel oranı, homojen dağılımındaki problemler ile parçacık-matris kimyasal tepkimeleri, döküm yerine TM teknikleriyle rahatlıkla aşılabilmektedir [102]. Toz metalürjisinin ana adımları Şekil 4.1’de gösterilmiştir.



Şekil 4.1. Toz metalürjisinde parça üretim iş akışı adımları [99]

Yüksek kaliteli ve karmaşık parçaların ekonomik olarak üretilebilmesi, toz metalurjisini cazip kılmaktadır. TM farklı boyut, şekil ve paketlenme özelliğine sahip metal tozlarını sağlam, hassas ve yüksek performanslı parçalara dönüştürür. Bu işlem; şekillendirme veya presleme ve daha sonra parçacıkların sinterleme yolu ile ısı bağlanması basamaklarını içerir. TM nispeten düşük enerji tüketimine, yüksek malzeme kullanımına ve düşük maliyete sahip otomatikleşmiş işlemleri verimlice kullanır. Sahip olunan bu özellikler ile TM verimlilik, enerji ve hammadde gibi günümüz kaygılarını ortadan kaldırır. Bunların sonucu olarak, TM konusu sürekli gelişmekte ve geleneksel metal şekillendirme uygulamalarının yerini almaktadır [103].

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

4.1.1. Toz metalurjisinin önemi

TM teknolojisini önemli kılan özellikler aşağıda özetlenmiştir [8]:

- TM parçaları sonraki talaşlı işlemlere ihtiyacı ortadan kaldıracabilecek düzeyde, son şekil veya son şekle yakın olarak seri üretilebilir.
- TM işlemi çok az malzeme ziyan eder (başlangıç tozunun yaklaşık %97'si mamule dönüştürülür).

- TM parçaları gözenekli metal parçaları imal etmek için belirli bir gözeneklilik seviyesinde yapılabilir (Örneğin; filtreler, yağ-emdirilen yataklar ve dişliler).
- Diğer yöntemlerle işlenmesi zor bazı metaller toz metalurjisiyle şekillendirilebilir (Örneğin; ampullerdeki tungsten filamentler TM ile üretilir).
- TM ile yapılan belirli alaşım kombinasyonları ve sermetler, başka bir yöntemle imal edilemezler.
- TM, boyut kontrolü bakımından çoğu döküm yönteminden daha üstündür.
- TM imalat yöntemleri ekonomik üretim için otomatize edilebilir.

4.1.2. Toz metalurjisinin sınırlılıkları ve zayıf yönleri

TM teknolojisinin zayıf yönleri ve sınırlılıkları aşağıda özetlenmiştir [8]:

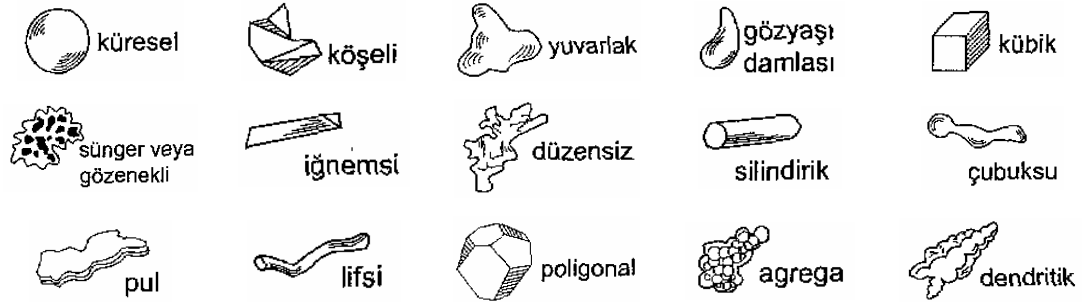
- Yüksek takım ve ekipman maliyetleri söz konusudur.
- Metal tozları pahalıdır.
- Metal tozlarının depolama ve nakliyle ilgili problemler vardır. (Örneğin; zamanla bozulma, belirli metallerde yangın hasarı).
- Metal tozlarının presleme sırasında kalıp içinde paralel olarak akması nedeniyle parça geometrisinde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

4.2. Toz Üretimi

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

- Parçacık boyutu ve dağılımı,
- Parçacık şekli (Şekil 4.2) ve iç yapısı,
- Yüzey alanı

olarak sıralanabilir [8, 99].



Şekil 4.2. Toz metalurjisindeki muhtemel parçacık şekilleri [99]

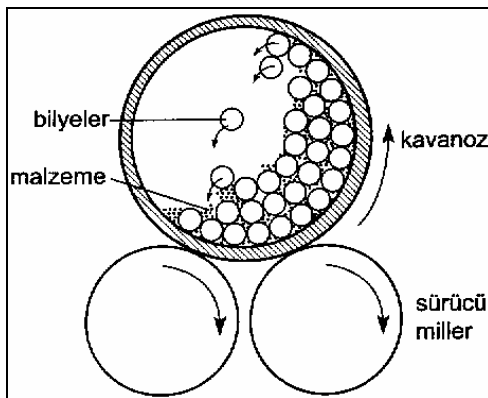
Toz üretim yöntemi üretilen tozun boyutu, şekli, saflığı, mikroyapısı, maliyeti ve diğer özelliklerini belirlemektedir. Bir tozun üretim yönteminin seçilmesi yöntemin anlaşılmasına, ekonomikliğine, elde edilen tozların özelliklerine ve bu özelliklerin kullanım yeri ihtiyaçlarını ne ölçüde karşılayabildiğine bağlıdır. Toz üretiminde kullanılan ana yöntemler, mekanik öğütme, kimyasal tepkime, elektrolitik biriktirme, sıvı atomizasyonu ve buharı yoğunlaştırma [99].

4.2.1. Mekanik üretim yöntemleri

Darbe, aşındırarak öğütme, kesme ve basma olmak üzere dört ana mekanik öğütme yöntemi vardır. *Darbe*, malzemeye çekiçle vurma gibi çok hızlı ve anlık uygulamaları içerir ve malzeme küçük parçalara ayrılır. *Aşındırarak öğütme*, aşındırıcıların birbiri üzerinde sürtünme hareketi sayesinde parçacıkların boyutunun küçültülmesidir. *Kesme*, talaşlı imalatta olduğu gibi kesme işlemi ile malzemenin parçalanmasıdır. Kesme ile oluşturulan tozların büyük olma eğilimi vardır. Son olarak, *basma kuvvetleri* ile bir malzeme kırılma noktasına kadar deformasyona uğrattıldığında toz haline getirilir. Bu yöntemlerde darbe, sıkıştırma ve burma kuvvetleri ile iri ve karmaşık şekilli tozlar üretilir. Bu yöntemlerde, en az maliyetle toz üretimi için, kayma sistemi az olan kimyasal bağları zayıf, karmaşık şekilli yapıya sahip malzemeler ile çok sert ve kırılgan olan metal alaşımları ve seramikler kullanılır [99]. Bu yöntemlerden bazıları aşağıda detaylandırılmıştır.

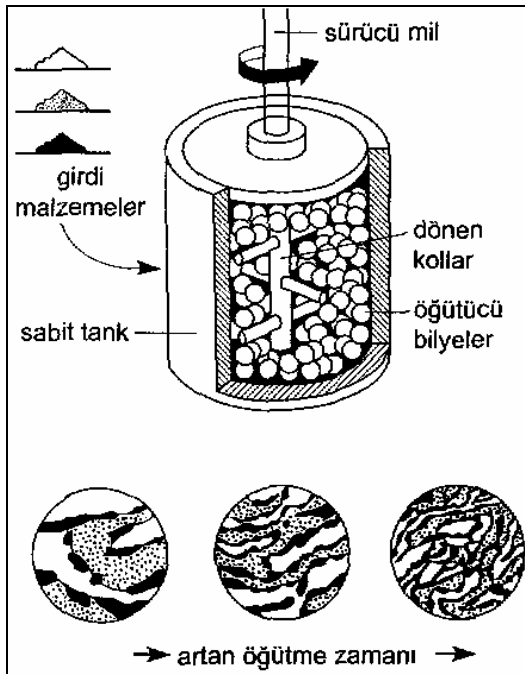
Talaşlı imalat: Haddelenmiş malzemelerin talaşlı imalatında kesme ile düzensiz şekilli iri tozlar elde edilir. Metal işleme tekniklerinde ortaya çıkan çok miktarda talaş hurdası metal tozu için büyük bir kaynaktır. Bu hurdalar kimyasal tekniklerle temizlenir ve boyutlarının küçültülmesi için öğütülürler. Bu yöntemin olumsuz tarafı, hava ve işleme sıvılarından kaynaklanan kimyasal kirlilikleri de içeren toz özelliklerinin kontrolünün zayıflığıdır. Talaşlı imalatta üretilen tozların kullanım alanı bazı polimerler ve sert metallerdir [99].

Öğütme: Öğütme, sert bilyeler, çubuklar veya çekiçler kullanılarak yapılan mekanik darbe işlemini kapsar ve gevrek malzemelerden toz üretmede kullanılan klasik bir yöntemdir. Bu yöntemin basit olarak çalışma prensibi; bilyeler ve öğütülecek malzemenin bir kavanoz içerisine konularak döndürülmesidir. Kavanoz döndükçe bilyeler toz malzemeye sürekli olarak çarpar ve daha küçük parçacıklara ayrılır (Şekil 4.3). Öğütme bir çok sünek malzeme için kullanışlı değildir, çünkü bu tür malzemeler kırılarak ufalanma yerine şekil değiştirir veya topaklanır. Öğütmeye yardımcı olmak amacıyla akışkanlar ile oksitlenmeyi azaltan koruyucu ortamlar kullanılır. Öğütme ile elde edilen tozlar sert, düzensiz şekilli ve zayıf akma ve paketlenme özelliğine sahip olduğundan öğütme sonrası tavlama işlemi gerekebilir. Genellikle borürler, karbürler, nitrürler, oksitler ve intermetalikler bu yöntemle üretilir. Öğütme işlemleri birçok şekilde yapılmaktadır. Szegvari tipi dikey atritör, yüksek enerjili Spex tipi atritör, Zos tipi yatay atritör, Planetary Mill tipi atritör ve yeni tasarımlı atritörler [104].



Şekil 4.3. Öğütme yöntemiyle toz üretimi [99]

Aşındırarak öğütme ve mekanik alaşımlama: Mekanik alaşımlama (MA) yüksek enerjili atritör kullanılarak yapılan bir düşük sıcaklık sentezleme yöntemidir. Bu yöntemde iki yada daha fazla elementel toz birbiri içerisinde belli oranda karıştırılarak atritör içerisine konur ve mekanik alaşımlama işine tabi tutulur [6]. Genellikle kompozit malzeme tozları üretilir. Bu işlemde amaç değirmen içerisinde bilyelerle metal tozlarının ezilerek, kırılarak ve tekrar kaynaklaşarak yapılan bir kompozit toz işlemidir (Şekil 4.4). İşlem sonunda, metal tozlarını birbirine olabildiğince yedirilerek, istenilen oranlarda kompozit toz kıvamına getirilir [102].

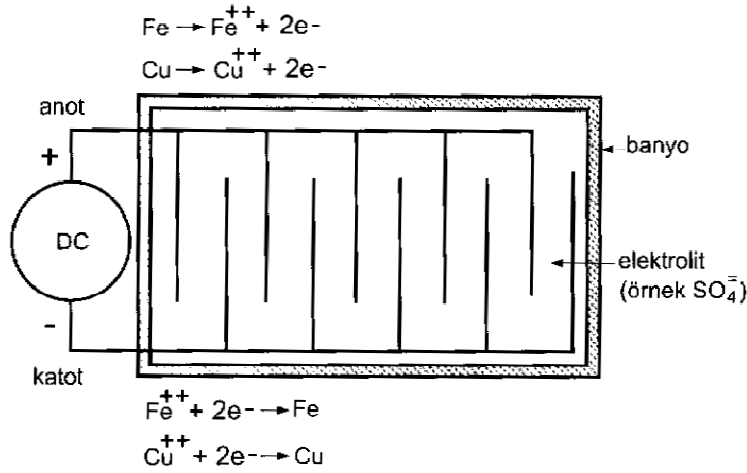


Şekil 4.4. Mekanik alaşımlama [99]

4.2.2. Elektrolizle üretim yöntemleri

Elektroliz yönteminin ana üstünlüğü yüksek ürün saflığıdır. Elektroliz süreci, Şekil 4.5'te şematik olarak gösterilen hücreye uygulanan voltaj altında anodun çözünmesi ile başlar. Bakır ve demir için anot ve katot tepkimeleri şekil içerisinde verilmiştir. Elektrolit içerisinde taşınım katot üzerindeki birikintinin saflaştırılmasında kullanılır. Katot üzerindeki gözenekli birikinti sıyrılır, yıkanır, kurutulur ve öğütülerek toz haline getirilir. Daha sonra gerilmeleri azaltmak ve uçucu maddeleri

gidermek için tavlama işlemi uygulanır [99]. Elektrolitin kimyasal bileşimi ve mukavemeti, sıcaklık, akım yoğunluğu gibi şartları uygunca seçerek, birçok metal sünger veya toz durumunda katot üzerinde biriktirilebilir. Bu yöntemle üretilen metallerin başında bakır gelir, aynı zamanda paladyum, krom, demir, çinko, mangan ve gümüş de bu yöntemle üretilir [7].



Şekil 4.5. Elektroliz yolu ile üretimin şematik gösterimi

Normalde elektrolizle üretim sadece metal tozlarının üretiminde kullanılmakta ve alaşım veya bileşiklere uygulanamamaktadır. Kirlilikler tozların oluşmasını ve katot üzerinde birikmesini engellerler ve bunların çok sayıda oluşum kaynakları vardır. Elektrolizle biriktirmeden sonra ürün temizlenmeli ve öğütülmelidir. Bunlar maliyeti ve artık maddeleri önemli ölçüde artırır. Bu nedenler ve diğer çevresel sorunlar elektrolizle toz üretim yöntemlerinin kullanımını sınırlandırmaktadır [99].

4.2.3. Kimyasal üretim yöntemleri

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

Katının gazla bozunması: Metal tozu üretmenin klasik bir şekli oksit indirgemesidir. İşlem manyetik ayrıştırılmış ve ince oksit tozlar olarak öğütülmüş demir oksit örneğinde olduğu gibi saflaştırılmış bir oksit ile başlar. Oksit, grafit ve kireç taşı gibi indirgeyiciler ile karıştırılır ve ısıtılır. Bu ilavelerden ortaya çıkan karbon monoksit

gibi gazları içeren reaksiyonlar ile oksit indirgenir. Çoğunlukla ürün süngerimsidir ve kırılarak veya öğütülerek toz haline getirilmesi gerekir [99]. Burada saflık, malzemenin kalitesini belirler. Oksit ve karbonun maliyetinin düşük olması, gözenekli toz üretim imkanı, oksit ve parçacık boyutunun kontrolü bu yöntemin avantajı olarak bilinirken, indirgeyici gazların maliyetinin yüksek olması, toz saflığının oksit saflığına bağlı olması, alaşım tozlarının üretim imkansızlığı bu yöntemin dezavantajı olarak bilinmektedir [105].

Oksitlerin indirgenmesi sırasındaki davranış hem termodinamik hem de kinetik hususlardan dolayı sıcaklığa bağlıdır. Termodinamik husus, metal oksidin indirgeyici gaza karşı ne kadar kararlı olduğu ile ilgilidir. Gaz ile indirgenme molibden, volfram ve bakır tozlarının üretiminde de uygulanmaktadır. İndirgeme parametrelerinde yapılan değişiklikler sonucu tozların parçacık boyutu ve şekli çeşitlilik gösterir. Bu parametreler; gaz bileşimi, sıcaklık, tepkime kinetiği ve indirgenen madde yatağı kalınlığıdır.

Isıl bozunma: Toz parçacıkları buhar bozunması ve yoğunlaştırmanın birlikte kullanılması ile üretilebilir. En yaygın olarak demir karbonil ($\text{Fe}(\text{CO})_5$) ve nikel karbonil ($\text{Ni}(\text{CO})_4$) bu yöntemle elde edilir. İşlem bir metal ile karbon monoksitin tepkimesiyle başlar. Örnek olarak, nikel karbonil üretmek için biçimlendirilebilir nikel ile karbon monoksit eşzamanlı ısıtma ve basınç uygulanarak tepkimeye sokulur. Karbonil molekülü $43\text{ }^\circ\text{C}$ 'ye soğutulur ve sıvı hale getirilir ve saflaştırmak için kısmi damıtma kullanılır. Sıvı bir katalizörle birlikte tekrar ısıtıldığında buhar bozunması ile toz elde edilir. Bu yöntemde tepkime şartlarını kontrol ederek toz boyutunu 0,2-20 mm arasında elde etmek mümkündür [99].

Bakır, krom, platin, rodyum, altın ve kobalt gibi diğer metaller karbonil işlemi için uygundur. Ancak yüksek enerji ihtiyacı ve karbonil moleküllerinin sağlığa zararları bu yöntemin kullanım yaygınlığını azaltmaktadır.

Sıvıdan çökeltme: Nitrat, klorür veya sülfat gibi çözünmüş bileşikler kimyasal işleme tabi tutularak çökeltilmiş parçacıklar üretilebilir. Kimyasal olarak çökeltilmiş tozlar 1

mm boyutunda ve %99,8 saflıktadır, fakat toz özellikleri işlem değişkenleri sayesinde ayarlanabilir. Küçük parçacık boyutları nedeniyle ürünlerin çoğu topaklanma eğilimi gösterir. Çözeltilerin reaktör içerisinde dolaştırılması ile daha büyük toz boyutları oluşturmak mümkündür.

Bu yöntemle çeşitli çökeltme teknikleri kullanılarak kompozit toz oluşturmak mümkündür. Titanyum tetra klorür ($TiCl_4$), toryum oksit (ThO_2), titanyum oksit (TiO_2) ve tungsten karbür (WC) gibi kompozit tozlar üretilebilir ve bunlar dağılımla güçlendirilmiş alaşımlarda ve aşınmaya dayanıklı kaplamalarda kullanılır.

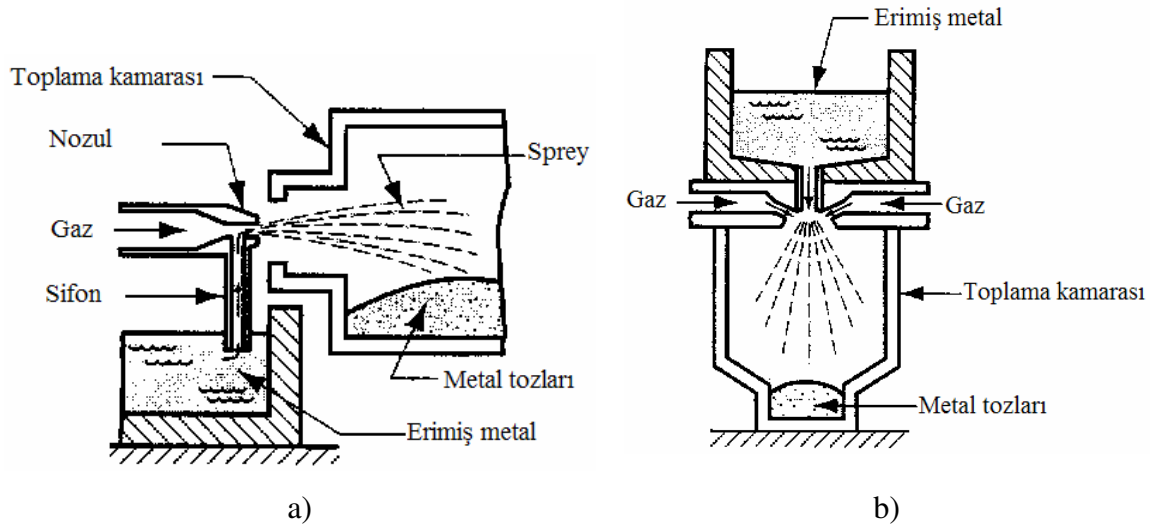
Gazdan çökeltme: Gaza dayalı tepkimeler küçük tozların az kirlilikle üretilmelerinde kullanılır. Vanadyum, niyobyum, volfram, titanyum, gümüş, kobalt, nikel veya zirkonyum gibi metallerin klorürleri, florürleri veya oksitleri gazdan çökeltme işlemi için uygundur. Nano ölçekli tozların homojen çekirdeklenmesi elektron ışını, lazer, plazma veya endüksiyon alanı kullanılarak çeşitli buharlardan elde edilir. Bu parçacıklar 10-1000 nanometre boyutundadır. Pahalı bir toz üretim yolu olmasına rağmen parçacık boyutu, saflığı, şekli ve topaklanması buhar tepkimesi koşulları ile ayarlanabilir [99].

4.2.4. Atomizasyon yöntemleri

Su, gaz, savurmalı (santrifüj), vakum ve ultrasonik gaz atomizasyonu gibi farklı yöntemler kullanılarak ergimiş metal alaşımlarından, ergiyiğin sıvı demetini farklı akışkanlar ile ve mekanik kuvvetler kullanılarak sıvı damlacıkları haline getirmek ve daha sonra bunları katılaştırarak toz üretme teknolojisi atomizasyon olarak bilinir [106]. Amaç, ergimiş metali yüksek enerjili gaz veya sıvı çarpmasına maruz bırakarak sıvı metali daha küçük parçalara ayırmaktır. Atomizasyon ünitesindeki nozulun geometrisi, atomize eden akışkanın basıncı ve hacmi, sıvı metalin akış çapı gibi birçok parametreyi değiştirerek toz boyutu dağılımını kontrol etmek mümkündür. Tanecik şekli ise katılma hızı ile belirlenir ve düşük soğutma kapasiteli gazlar için küresel şekilden yüksek soğutma kapasiteli su için karmaşık şekle dönüşür. Genelde bu yöntem, ergitilebilen tüm malzemeler için uygulanabilir

ve ticari olarak demir, takım çelikleri, alaşımlı çelikler, bakır, pirinç, bronz, alüminyum, kalay, kurşun, çinko ve kadmiyum tozlarının üretilmesinde kullanılır.

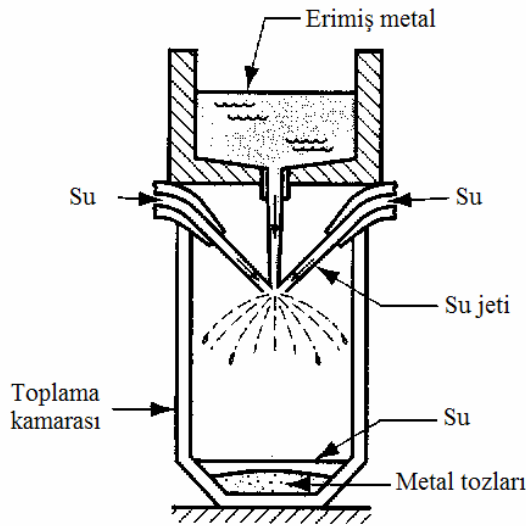
Gaz atomizasyonu: Gaz atomizasyonu ergiyik metal demetine, yüksek basınçlı gazın belli bir açı ile püskürtülerek hüzmelerin dağılımı ile sıvı metal damlacıkları elde edilmesi işlemidir. Genellikle hava, azot, argon ve helyum gazları kullanılır. İki ya da daha fazla ağızlık, sıvı metalin akma eksenine etrafına eşit açıda yerleştirilir ve gaz hüzmeleri ile ergiyik metal demeti bir noktada kesişirler. Bu bölgeye atomize bölgesi denir (Şekil 4.6). Bu yöntemle üretilen tozlar ince küresel ve yüzeyde oksit olmayan tozlar üretilir. Kimyasal saflıkları iyidir [107].



Şekil 4.6. Gaz atomizasyon ünitesi [8]
a) Yatay, b) Dikey

Gaz atomizasyon ünitelerinin tasarımında sıvı damlacığın katılaşma öncesi ne kadar uzağa gidebileceğinin bilinmesi gereklidir. Eğer kule küçük yapılırsa, damlacıklar kule duvarlarında birikir ve hatta duvarı ergitebilir. Diğer taraftan, atomizasyon ünitesi çok büyük yapılırsa maliyeti çok fazla olacaktır. Hızlı gaz genişlemesi sonucu parçacıklar atomizasyon bölgesinin dışına ivmelendirilir, fakat giderek sürtünme kuvvetleri yavaşlar. Uygun atomizasyon şartlarında, 100 μm parçacık boyutu için hesaplamalar, ünite boyutunun 10 m olması gerektiğini göstermektedir [99].

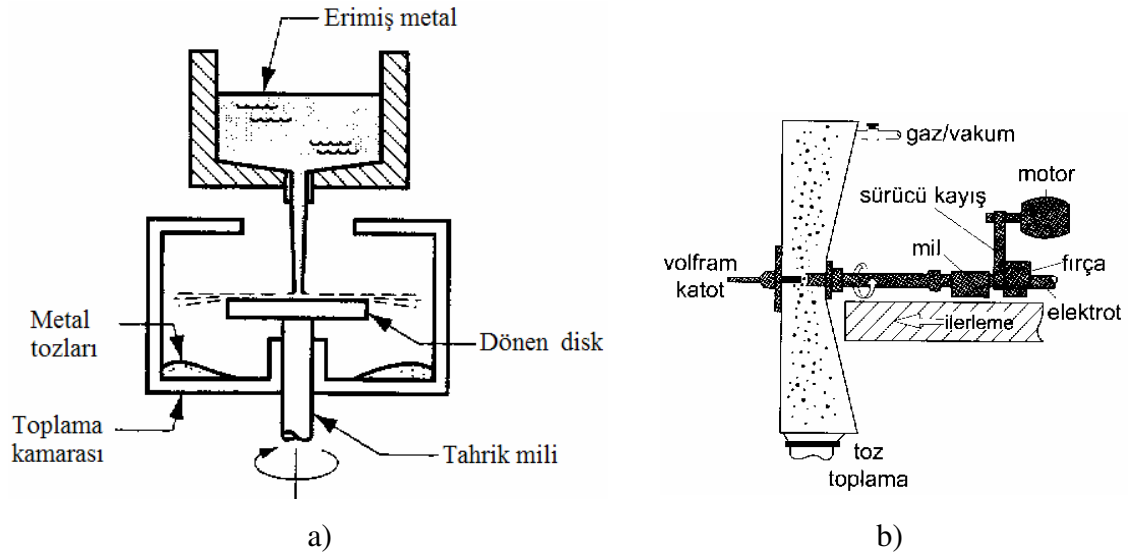
Sıvı ve su atomizasyonu: Gaz yerine bir sıvının ergiyik demetini parçalamada kullanılmasıdır. Sıvı olarak su ve yağ kullanılır. 1600 °C'den düşük sıcaklıklarda ergiyen az reaktif malzemeler için suyun kullanımı çok yaygındır. Yüksek basınçlı su jetleri ergiyik demetine yönlendirilerek onun parçalanmasını ve hızlı katılaşmasını sağlar. Su genellikle birkaç jetten yönlendirilir. Bu yöntem gaz atomizasyonuna benzer, ancak parçacıklar daha hızlı soğur ve atomizasyon sıvısı çok daha yüksek verimle hızı küçük tozlara aktarır (Şekil 4.7). Su gaza göre çok az sıkıştırılabilirliğe ve daha yüksek yoğunluğa sahip olduğundan, ergiyik demeti ile su nozulu arasındaki mesafe çok önemli bir etken değildir.



Şekil 4.7. Su atomizasyonu ünitesi [8]

Savurmalı (santrifüj) atomizasyon: Savurmalı atomizasyon, ergiyiğin döndürülmesi sonucu oluşan mekanik kuvvet (merkezkaç kuvveti) etkisi ile damlacıkların katılaşması ile parçacıkların oluşturulması esasına dayanır. Pota ile temasın güçlük yarattığı yüksek sıcaklık malzemeleri veya reaktif malzemeler için çok kullanışlı bir yöntemdir [99]. Merkezkaç kuvvetinden dolayı santrifüj atomizasyonu olarak da adlandırılır ve iki çeşit santrifüj atomizasyonu vardır. Bunlardan birinde, bir kap içindeki ergiyik metal, ergiyik metalin damlacıklara ayrılması için, uygun bir hızda düşey eksen etrafında döndürülür veya bir metal demeti dönen bir disk veya koni üzerine akıtılır (Şekil 4.8a). Diğerinde ise, bir metal çubuk yüksek hızda döndürülür ve serbest uçta elektron ışını veya plazma arkı vb. ile ertilir. Bu ikinci tip işlem,

döner elektrot atomizasyonu olarak bilinir ve çubuk düşey veya yatay ekseninde döndürülebilir (Şekil 4.8b) [7, 8, 103].



Şekil 4.8. Savurmalı atomizasyon ünitesi [8, 99]

a) Dönen disk ile savurmalı atomizasyon

b) Döner elektrolit ile savurmalı atomizasyon

Savurmalı atomizasyon ile yüksek paketlenme yoğunluğu ve kolay akış özelliklerine sahip, temiz ve küresel şekilli tozlar oluşturulabilir. Bu yöntemin olumsuz yönleri düşük üretim hızları, yüksek donanım ve işletme maliyeti ile büyük parça boyutudur [99].

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

Ergiyiği enerji aktararak parçalamak için kullanılan diğer atomizasyon teknikleri de vardır. Bunlar arasında titreşen teller, yüksek hızlı haddeler, dönen potalar ve ergiyik patlatmalı atomizasyon üniteleri sayılabilir. Bir telin ucunda ark meydana getirilerek

yağ içerisinde kıvılcım erozyonu ile parçacık üretilir. Hadde atomizasyon ünitelerinde hızla dönen bir merdane ergiyik demetini pul şeklinde parçalar. Bu yöntemin ana avantajı amorf malzeme üretmek için gerekli yüksek soğuma hızlarını sağlamasıdır. Patlatmalı atomizasyon ise basınç, hız ve hidrojen ayrışması ergiyiğin vakum odasına patlamasına neden olur. Bu teknik süper alaşım tozlarının üretilmesinde kullanılır [99].

4.3. Tozların Öğütülmesi ve Karıştırılması

Tozlar üretildikten sonra, geleneksel TM süreci üç aşamadan oluşur:

- Tozların öğütülmesi ve karıştırılması,
- Sıkıştırma – istenen parça şekline presleme,
- Sinterleme – parçacıkların katı hal bağını sağlamak ve parçanın dayanımını arttırmak için erime sıcaklığının altında ısıtma.

Bunlara ek olarak, bazen boyutsal doğruluğu iyileştirmek, yoğunluğu arttırmak ve diğer nedenlerle ikincil işlemler uygulanır. Sıkıştırma ve sinterlemede başarılı sonuçlar elde etmek için, başlangıç tozları homojen olmalıdır. Bunun için tozlar iki işleme tabi tutulurlar; öğütme ve karıştırma [8].

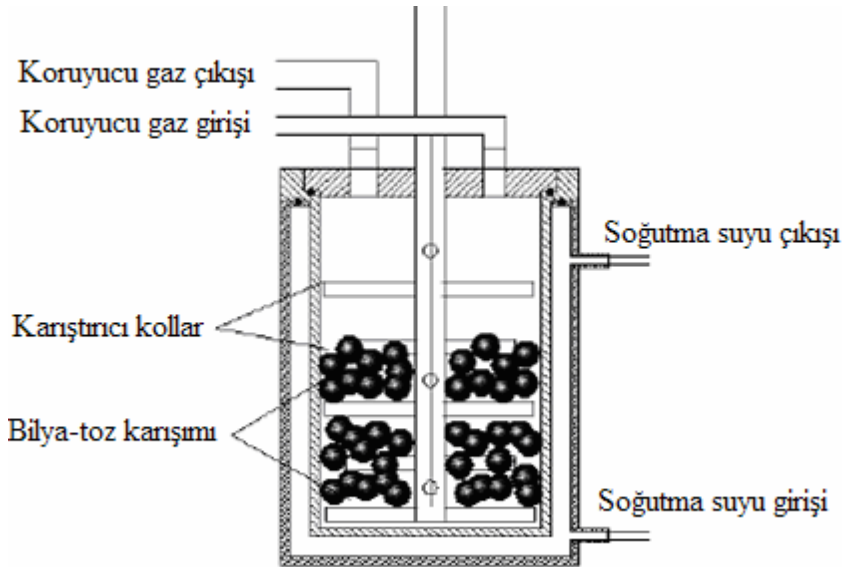
Öğütme: Aynı kimyasal bileşimde ancak farklı parçacık boyutlarındaki tozlar birbirine benzetilir. Farklı parçacık boyutları çoğu kez gözenekliliği azaltmak için öğütülür.

Karıştırma: Farklı kimyasal bileşimdeki tozlar birbiriyle karıştırılır. TM teknolojisi, değişik metallerin, diğer yöntemlerle imal edilmeleri çok zor hatta olanaksız olan alaşımlarla karışmasına imkan sağlar.

Seçilen metal tozları, dengeli homojen karışımı verecek şekilde karıştırılmalı ve bu karışım, kalıbın bütün bölgelerine dolacak akıcılıkta olmalıdır. Bunu başarmak için tozlar hassas bir şekilde tartılmalı, grafit gibi metal olmayan malzeme ile birlikte karıştırıcıya konulmalı ve katı yağlayıcı %0,5 ile %1,5 arasındaki bir oranda

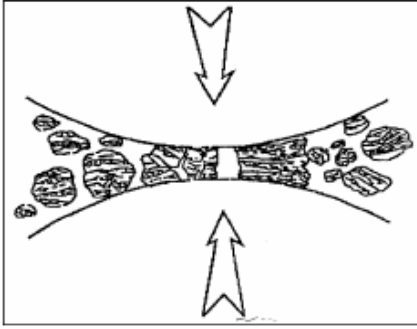
olmalıdır. Karıştırma zamanı ve hızı, sonradan gelecek işlemlerdeki malzeme davranışlarına ve üretilen parçanın özelliklerine etki eder. Kalıp aşınmasını en aza indirmek ve sıkıştırma basıncını azaltmak için yağlayıcıların bütün tanelerle temasta olabilecek şekilde karıştırılması gerekir. Karıştırmanın amacı, farklı yapıdaki malzemelerden isteğe ve ihtiyaca bağlı yeni bir karışım elde edilmesidir [99].

Karıştırma işlemi için yüksek enerjili atritör çalıştırıldığında, yüksek bir enerji ile bilyeler birbirine çarpar ve çarpmanın etkisiyle bilyeler arasında kalan tozlar ezilir. (Şekil 4.9) Aynı zamanda sert olan malzeme daha küçük parçalar halinde kırılarak yumuşak matris içerisine gömülür.



Şekil 4.9. Yüksek enerjili atritörün şematik görünümü [7]

Şekil 4.10'da bilyelerin çarpışması sonucu ezilen ve birbirine kaynayan tozlar görülmektedir. İşlem devam ettikçe tozlarda pekleşme, soğuk kaynama ve kırılma devam eder. Çok kısa bir sürede dahi karışım elde edilir. Ancak homojen değildir. Artan karıştırma zamanına bağlı olarak katmanlı yapı kaybolur ve homojen bir yapı elde edilir [108].



Şekil 4.10. Bilyalar arasında ezilen kompozit tozların şematik görünümü

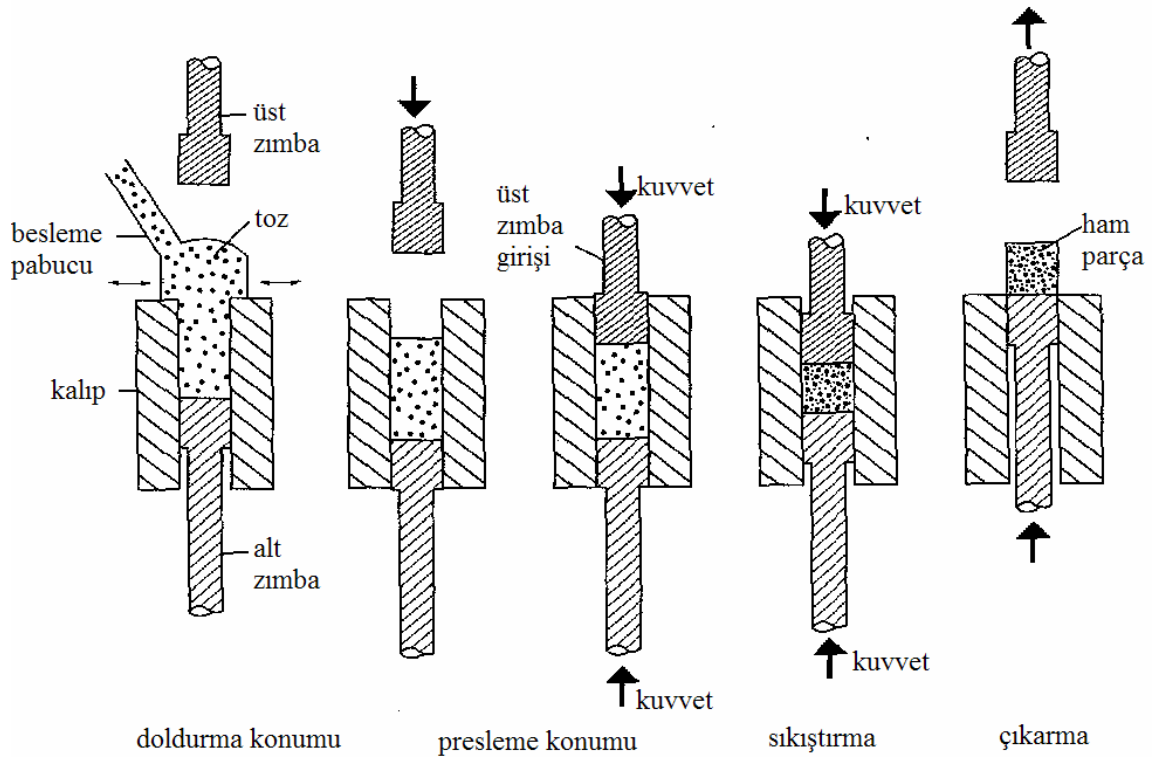
Karıştırma, esasında kuru ve katı haldeki tozların birbirine periyodik olarak kaynaklanması ve tekrar bu büyüyen malzemelerin kırılmasını sağlayarak daha ince ve daha homojen bir mikro yapı elde edilmesini sağlayarak, dayanımı yüksek olan kompozit malzemelerin üretilmesinde kullanılır [11]. Karıştırma işleminin istenilen özelliklerde malzeme tozu üretilebilmesi için karıştırma parametrelerinin iyi bilinmesi gerekir. Bu parametreler; karıştırma tipi, karıştırma kabının cinsi, karıştırma işleminin hızı, karıştırma süresi, karıştırıcı bilyaların tipi, ebatı ve ebat dağılımları, bilya toz oranı, karıştırma kabı doluluk oranı, karıştırma ortamı, işlem kontrol kimyasalları ve karıştırma sıcaklığıdır [7].

4.4. Tozların Sıkıştırılması

Tozların en yaygın şekillendirme ve yoğunluk kazandırılma şekli, istenilen parça geometrisine göre yapılmış olan kalıp içerisinde basınç uygulamaktır. Tozlar basınç uygulandığında; önce parçacıklar birbiri üzerinden kayarak her bir parçacık 4-6 komşusu ile temas edecek şekilde kalıp içinde yerleşir. Basınç uygulamaya devam ettikçe temas eden parçacık sayısı (*koordinasyon sayısı*) artar ve parçacıklar sertliklerine oranla şekil değiştirerek bağ oluşturur. Sonuç olarak çoğu zaman tek yönde bir kalıp içerisinde sıkıştırılan toz taşınabilecek mukavemeti olan bir kütleye dönüştürülmüş olur. Presleme sırasında kalıpta oluşan ardışık hareketler Şekil 4.11’de gösterilmiştir. Kalıpta sıkıştırma çevriminde, alt zımba doldurma konumunda iken kalıp boşluğuna tozlar doldurulur. Besleme pabucunun geri çekilmesinden sonra ölçülü toz miktarı presleme konumuna çekilir. Üst zımba kalıba girer, alt ve üst

zımbalar merkeze doğru ilerletilir. Sıkıştırırmadan sonra, üst zımba geri çekilir ve alt zımba çevrimin tekrarından önce parçayı çıkartır [99].

Sıkıştırılmış toza ham parça adı verilmektedir. Presleme sonrası yoğunluk ham yoğunluk, presleme sonrası mukavemet ise ham mukavemet olarak adlandırılmaktadır. Preslemeden sonra ham parça kalıbın içinde mekanik olarak kilitlenmiş durumdadır. Parçayı kalıptan çıkartacak kuvvete çıkartma kuvveti denir. Sıkıştırma basıncı arttıkça parçanın kalıptan çıkartılması güçleşir ve kalıp aşınmasını azaltmak için yağlayıcı kullanılmalıdır. Burada yağlayıcının, hem çıkartma kuvvetinin azaltılması hem de kalıp aşınmalarının azaltılması bakımından önemi büyüktür [99].



Şekil 4.11. Tozların sıkıştırılmasında işlem sırası [99]

Kalıpla sıkıştırırmada en önemli zorluklardan birisi kalıp yüzeyinde oluşan sürtünmedir. Kalıbın iç yüzeyinde oluşan sürtünme, diğer bütün kuvvetlerden büyüktür. Bu kuvvet kalıbın merkezine doğru azalır. Bu sırada basınçtan dolayı toz parçacıklarının yer değiştirmesi esnasında toz parçacıkları, üzerindeki basıncın tesiri ile

direncin en az olduğu yöne dolayısıyla daha az yoğun bölgelere kaçma eğilimi gösterir. Böylece kısmen yanlara doğru, fakat daha çok kalıp merkezine doğru bir toz akışının olduğu anlaşılmaktadır [6]. Bu sürtünme, ham parçanın kolay çıkartılmasını engellediği gibi aynı zamanda yoğunluk farklılıklarının oluşmasına sebep olur. Kalıp yüzeyi sürtünmesine bağlı olarak oluşan değişken ham yoğunluk, parçanın sinterleme sırasında çarpılmasına neden olur. Dolayısıyla kalıp yüzeyi sürtünmeleri sinterlenmiş toleransları kısıtlamaktadır.

Preslenmiş parçanın tüm yüksekliği değerlendirilirse, daima basıncın büyüdüğü yönde akıp giden bir yoğunluk düşmesi tespit edilebilir. Tek yönlü preslemelerde parçanın zimbaya en uzak bölgesinde, çift yönlü preslemelerde parçanın orta bölgesinde kötü yoğunluk dağılımı görülür. Preslenmiş bir parçanın yoğunluğundaki istenmeyen bu farklar parça boyu ile doğrudan alakalıdır [6]. Buna ek olarak, basınç kaldırıldığı zaman preslenmiş parça genişir ve bu olay geri yaylanma olarak bilinmektedir. Parçanın genişmesi, çıkartma işleminden sonra kalıbın içine tekrar girmemesinden anlaşılmaktadır. Geri yaylanma sıkıştırma basıncının karesiyle orantılı olup tipik olarak %0,2-0,4 arasındadır. Sinterlemeden sonra beklenen ölçülerin elde edilebilmesi için, bu boyutsal değişim kalıp tasarımında göz önüne alınmalıdır [99]. Bu anlamda, sıkıştırma mekanizmasının iyi bilinmesi kalıp tasarımındaki parametre ve kriterleri belirleyici yönde bir etkiye sahiptir [6].

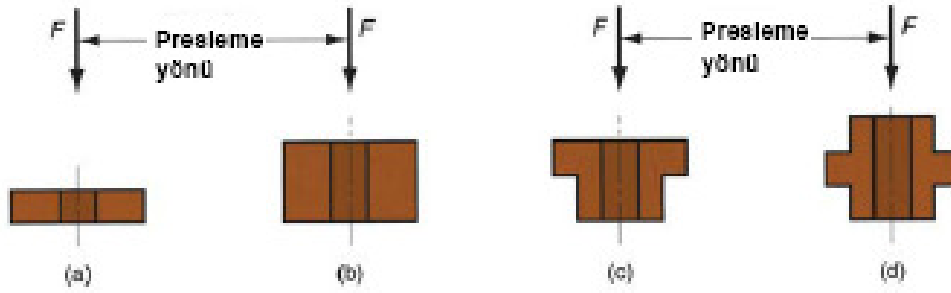
Presleme sırasında, görünür yoğunluğun ham yoğunluğa dönüşmesi sıkıştırılabilirlik olarak tanımlanmaktadır. Parçacık boyutu sıkıştırılabilirliğin önemli bir faktörüdür. Küçük parçacıkların görünür yoğunluğu düşüktür, genellikle serttirler ve sıkıştırma sırasında hızlı pekleşmeye maruz kalırlar. Bu sebeplerden dolayı preslenmeleri zordur. Aynı zamanda, küçük tozlar ve sünger tozlar kalıptan çıkartma sırasında daha fazla geri esneme yapacağından çatlak oluşma ihtimali yüksektir. Kalıpta presleme ile yüksek ham yoğunluğa sıkıştırılabilecek şekilde tasarlanmış tozlar genellikle yumuşak ve büyüktür. Yüksek sertlik tüm sıkıştırma basınçlarında ham yoğunluğu düşürmektedir. Kuvvetli ve sert olan alaşımlı tozlar, paslanmaz çelikler, manyetik alaşımlar, takım çelikleri ve kompozitlerin preslenmesi için yüksek basınçlar gereklidir [99].

Ayrıca, tozlar aynı şekil ve boyutta olmadığından sıkıştırma öncesi, tozların homojen dağılımlarını elde etmek amacıyla yağlayıcılarla birlikte belli bir süre karıştırılması toz taneleri arasındaki sürtünmeleri azaltmak suretiyle tozların akışını kolaylaştırmakta ve meydana gelecek enerji kayıplarını azaltmaktır [7]. Yağlayıcı ve toz optimum bir sürede karıştırılmalıdır. Fazla karıştırma, düşük ergime derecesine sahip yağlayıcının ısınarak yapışkan bir hal almasına sebep olabileceği gibi, az karıştırma ise yağlayıcıdan beklenen özelliği karışıma yansıtmaz. Bazı yağlayıcılar yapıştırıcı görevi görüp mukavemet artışına sebep olduğu gibi bazıları ise sinterleme esnasında yanarak gözenek artışına sebep olur ve buna bağlı olarak sinterleme ile artması gereken yoğunluk düşebilmektedir [109]. Düşük sıkıştırma basınçlarında yağlayıcı sürtünmeyi azaltır ve yoğunlaşmayı iyileştirir. Buna karşılık, yağ parçacıkları da hacim işgal ettiklerinden, yüksek basınçlarda yoğunlaşmayı düşürmektedir. Yağlayıcı, parçacıklar arasında iyi bağ oluşmasını engelliyorsa böyle genleşmeler çatlak oluşumuna neden olur. Pratikte özellikle düşük miktarlarda kullanıldığı zaman yüksek vizkoziteli yağlayıcılar tercih edilir [99].

4.4.1. Sıkıştırma yöntemleri

TM ile üretilen makine parçalarının şekil ve boyu üzerindeki kısıtlamalar sıkıştırma işlemleri ile ilgilidir. Metal tozlarını preslemek için birçok uygun yöntem vardır. Fakat bunlardan çok azı homojen dağılım sağlayabilir. Özellikle karmaşık parçalarda bu daha da zordur [6].

Presleme zorluğunu belirlemenin yollarından biri parçanın sahip olduğu kademe sayısını bilmektir. Kademe sayısı arttıkça kalıbın karmaşıklığı da artar [99]. Metal Tozları Endüstrileri Federasyonu (MPIF), toz metalurjisi parça tasarımı için geleneksel preslemedeki zorluk seviyesine göre dört sınıf tanımlamaktadır. Bu sınıflandırma, geleneksel TM yöntemiyle ulaşılabilecek şekil sınırlamalarının bazılarını gösterdiğinden faydalıdır (Şekil 4.12).



Şekil 4.12. TM parçaların dört sınıfı (yandan görünüşleriyle; enine kesitleri daireseldir) [8]

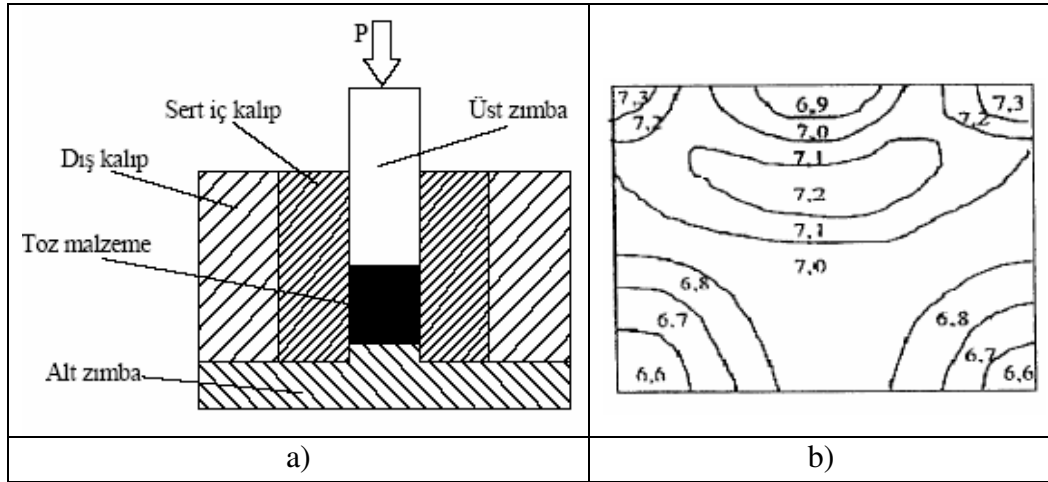
Şekil 4.12’de şematik olarak verilen parçalarda; a) 1. sınıf parçalar basit, tek kademeli ve boy-çap oranı düşük olup bunlar tek hareketli preslerde sıkıştırılır. 2. sınıf parçalar yine tek kademelidirler, ancak yüksek boy-çap oranına sahip olduklarından üst ve alt taraftan çift hareketli sıkıştırılırlar. 3. sınıf parçalar iki kademelidir ve basınç üst ve alttan birlikte uygulanır. Son olarak, 4.sınıf parçalar çok zor preslenebilen şekilli parçalardır. Bunlar çok kademeli parçalar olup, basınç üst ve alt hareketli zımbalar ile uygulanır [99].

Tek hareketli sıkıştırma

Tozlara uygulanan basınç tek bir zımbadan uygulanırsa parça yoğunluk açısından daha az homojendir ve bu işleme tek hareketli sıkıştırma adı verilmektedir [99]. Tek hareketli sıkıştırmada, dikey doğrultuda deformasyonun başlamasıyla, tozlar arası ve toz-kalıp çeperi arasında oluşan sürtünme düzensiz bir basınç dağılımına sebep olmaktadır. Bu nedenle uygulanan basınç kalıp içindeki tozlara düzenli olarak iletilememektedir. Dolayısıyla iş parçasındaki yoğunluk homojen bir dağılım sergilememektedir (Şekil 4.13). Yoğunluk, hareketli zımbaya yakın bölgelerde daha yüksek olmakta ve sabit zımbaya doğru giderek azalmaktadır. Yoğunluktaki bu azalma iş parçasının boy/çap oranına bağlıdır [109, 110].

Kalıp duvarının tozlardan çizilmemesi ve aşınmaması için çok sert olması gerekir. Bundan dolayı genellikle sert metal kalıplar kullanılmaktadır. Diğer önemli faktör ise, yükseklik ve çap arasındaki ilişkidir. Tek hareketli sıkıştırmada, başlangıçta

kalıba doldurulan toz kütlesindeki yüksekliğin çapa oranı ($Y/\varnothing$), presleme sonrası yoğunluk dağılımını direk etkilediğinden önemlidir. Bundan dolayı bu oranın $Y/\varnothing \leq 4$ olması önerilmektedir [110].

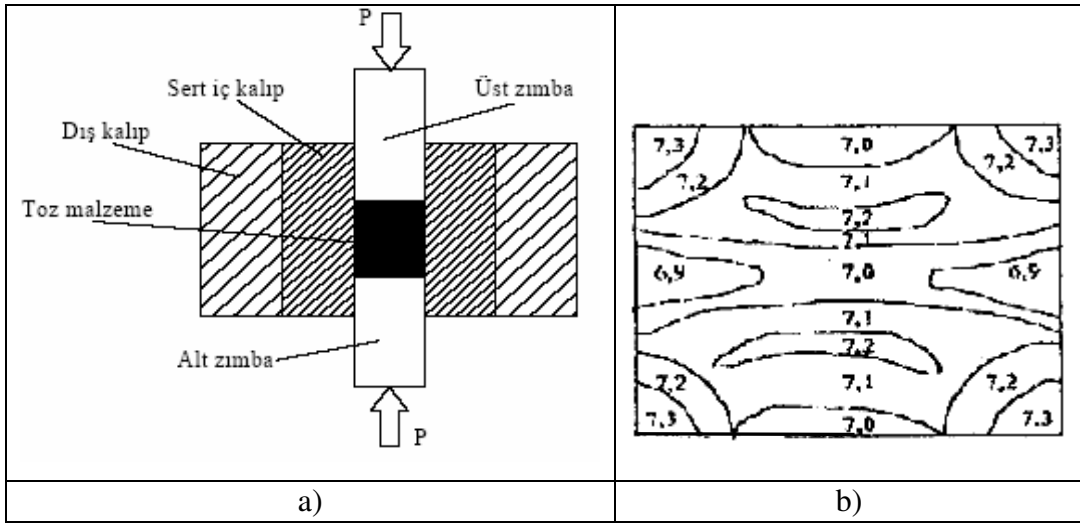


Şekil 4.13. Tek hareketli sıkıştırma [6]

a) Kalıbın şematik gösterimi, b) Yoğunluk dağılımı

Çift hareketli sıkıştırma

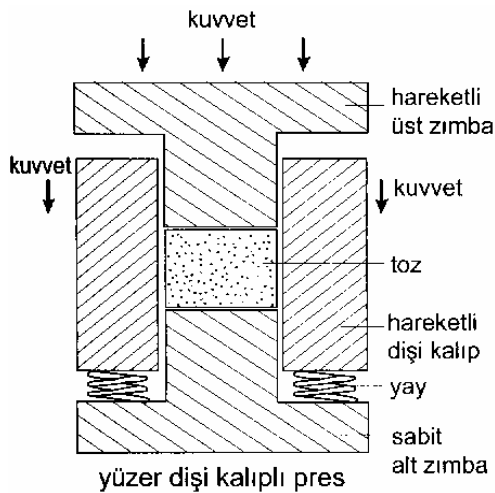
Basıncın alt ve üst zimbaların her ikisinden de yapıldığı işleme çift hareketli presleme denilmektedir. Bu preslemede toz, birbirine zıt yönlü olarak üst ve alt zımba tarafından aynı anda sıkıştırılmaktadır. Her yönden eşit veya farklı miktarda hareket veya basınç uygulanır. Çift hareketli sıkıştırma ile kalıp içerisinde boydan boya dengeli bir sıkıştırma temin edilir [6]. Bu yöntemde sıkıştırılan parçadaki yoğunluk dağılımı, tek hareketli sıkıştırma ile elde edilen parçaların yoğunluk dağılımından daha homojendir (Şekil 4.14).



Şekil 4.14. Çift hareketli sıkıştırma [6]

a) Kalıbın şematik gösterimi, b) Yoğunluk dağılımı

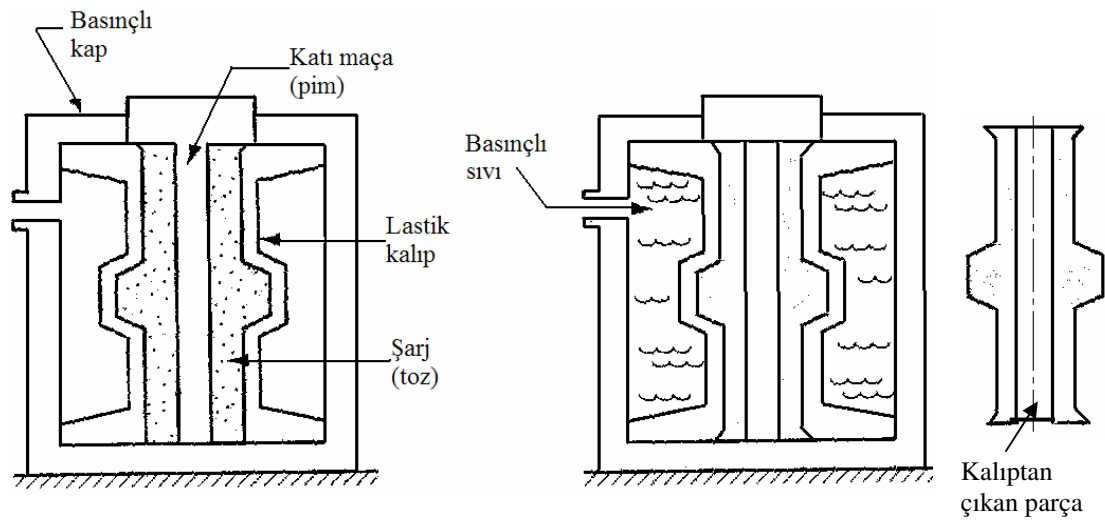
Bu yöntem içinde kullanılan diğer bir alternatif ise sabit bir alt zımba ve yüzer (hareketli) dişi kalıp ile yapılan preslemedir. Üst zımbaya basınç uygulandıkça, dişi kalıp duvarlarındaki sürtünme kuvveti, dişi kalıbın bir yaya karşı hareketlenmesine sebep olur. Böylece, sabit olan alt zımba dişi kalıbın merkezine doğru relatif hareket yapmış olur (Şekil 4.15). Parçanın çıkartılması için dişi kalıbın sabit zımbaya doğru hareketlenmesi gerekir.



Şekil 4.15. Çift hareketli alternatif sıkıştırma [99]

Soğuk izostatik sıkıştırma

Soğuk izostatik sıkıştırma, kademeli ve karmaşık şekilli parçalar veya boy/çap oranının büyük olduğu parçalar için uygulanan hidrostatik bir sıkıştırma işlemidir. Burada, toz elastik bir kalıp içinde sızdırmaz hale getirilir. Esnek kalıptaki hava sıkıştırma sırasında çıkacağından önceden boşaltılır. Daha sonra toz-kalıp birleşimi, yağ veya su gibi bir sıvı banyosundan oluşan bir basınç kabına daldırılır. Akışkana yüksek basınç uygulanarak, kalıp hidrostatik basınç etkisinde bırakılır (Şekil 4.16). Basınç kabından çıkarıldıktan sonra, parçanın üzerindeki esnek kalıp alınır ve genellikle bir daha kullanılmaz [6, 111].



Şekil 4.16. Soğuk izostatik sıkıştırma [8]

Soğuk izostatik presleme ıslak ve kuru kalıplama olarak iki şekilde yapılabilir. Islak kalıplamada, doldurulup sızdırmazlığı sağlanmış esnek kalıp bir sıvı haznesine konur ve Şekil 4.16'da görüldüğü gibi dışarıdan bir hidrolik sistemle basınç uygulanır. Sıkıştırılma yapıldıktan sonra esnek kalıp hazneden dışarı alınır ve sıkıştırılmış maça çubuğundan ve esnek kalıptan çıkartılır. Kuru kalıplama yöntemi ise seri üretimlerde kullanılır. Esnek kalıp basınç haznesi içine monte edilir. Esnek kalıp şekil değiştirir fakat hazneden dışarı çıkarılmaz. İki uçtaki tapalar vasıtasıyla toz doldurulur ve parça esnek kalıptan çıkartılır.

İzostatik presleme; büyük, uzun, ince veya kalıpta sıkıştırma yöntemiyle homojen olarak yapılmayacak parçaların üretiminde kullanılır. Kalıp yüzeyi sürtünmesi olmadığı için kalıpta sıkıştırma yöntemine göre daha fazla yoğunluk sağlar [99].

4.5. Sinterleme

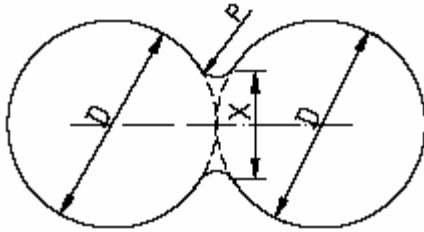
Sinterleme, metal tozlar arasında yayınım ve benzeri atom hareketleri ile bağ oluşturarak mukavemeti artıran bir ısıtma işlemidir. Sinterleme sırasında parçadaki geometrik değişimler atomların hareketini sağlayan ısıtmadan kaynaklanır. Yüksek sıcaklıklarda, çok sayıda atom komşuları ile bağlarını koparacak ve yeni yerlere gidecek düzeyde enerjiye sahip olacaktır. Atomların hareket edebilmesi için gerekli olan bu enerjiye *aktivasyon enerjisi* denir. Aktivasyon enerjisi malzemeye ve atomlar arası bağ kuvvetine bağlıdır. Bu nedenle sinterleme sıcaklıkları malzemelerin ergime sıcaklıkları ile ölçeklendirilir [99]. Sinterleme sıcaklığı ergime noktasına yaklaştıkça, hareket eden atomların sayısı arttığından sinterleme hızı artar. Sinterleme süresi 10 dakikadan birkaç saate kadar çıkabilmektedir [100]. Sinterleme sıcaklığı, tek bileşimli sistemlerde metalin ergime sıcaklığının $2/3$ 'ü veya $4/5$ 'i kadar alınır. Çok bileşimli sistemlerde ise ergime derecesi düşük olan metalin ergime sıcaklığının altında tespit edilir [99].

Sinterleme toz metalurjisinin en karmaşık konusu olmasının yanı sıra ham parçayı performansı yüksek bir ürüne dönüştürmesi yönüyle toz metalurjisinin en önemli tekniğidir. Sinterleme sırasında polimer yakılması, parçacıklar arası bağlanma, boyut değişimi ve mikroyapının önemli miktarda irileşmesi gibi birçok olay gerçekleşir. Sinterleme öncesi bağlayıcı veya yağlayıcı olarak kullanılan polimerler uzaklaştırılması (ham parçanın polimerin kararlılığını kaybedip buharlaşarak, bileşenlerine ayrıştığı sıcaklıklara ısıtılması sırasında gerçekleşir) sinterlenmiş parçanın yoğunluğunu doğrudan etkiler. Sinterleme sonrası ham parçada, yoğunluk, mukavemet, sertlik elektrik ve ısı iletkenlik, elastik modülü gibi özellik değişimleri meydana gelir [112].

Sinterleme işlemleri katı-hal sinterleme ve sıvı fazlı sinterleme olmak üzere iki farklı yöntemle yapılabilir. Sinterlenen parçanın istenilen özelliklere sahip olmasının yanında parçanın istenilen boyutlarda olması da bir zorunluluktur. Katı hal sinterleme teorik açıdan en iyi anlaşılmasına rağmen sinterlenmiş ürünlerin %70'i sıvı fazlı sinterleme ile üretilmektedir. Bu durum, kompozit özelliklerin ve hızlı sinterlemenin birlikte yansımalarıdır. En çarpıcı yanı da sıvı fazlı sinterlenmiş parçaların değeri toplam sinter ürünlerinin değerinin %90'ını oluşturmasıdır [99].

4.5.1. Katı-hal sinterleme teorisi

Sinterleme sırasında atom hareketleri görülmez, ancak hacim değişimleri meydana geldiğinden işlem genel de bu değişimler ile izlenir. Sinterlemenin temel ölçülerinden biri olan boyun büyümesi bunlardan bir tanesidir. Şekil 4.17'de iki küresel parçacığın sinterleme profili verilmiş olup burada boyun büyüklük oranı “ X/D ”, boyun çapının parçacık çapına oranıdır. Sinterleme işlemi sırasında, temas eden parçacıklar arasındaki bağlar kuvvetlenir ve kaynaklanmalar oluşur.

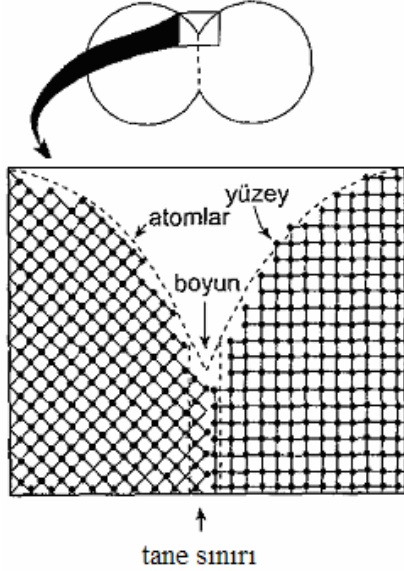


Şekil 4.17. İki küresel parçacığın sinterleme profili [112]

Şekil 4.18'de boyun bölgesi atom düzeyinde gösterilmiş olup burada yüzeyin bozulmuş atom bağı ile tanımlandığı ve tane sınırının da kusurlu olduğu görülmektedir. Atomlar kristal kafesindeki yerlerindedir, ancak bağlanma bölgesindeki kafes uyumsuzluğu tane sınırını oluşturur. Boyun bölgesi atom bağlarının önemli ölçüde kusurlu olduğu, yüzey ve hacim taşınım işlemleri ile büyüyen bölgeyi temsil eder.

Sinterleme işlemi başlangıç, ilk aşama, ara aşama ve son aşama olmak üzere dört zamanda tamamlanır. Şekil 4.19'da gösterildiği gibi birbirleriyle temas halinde olan

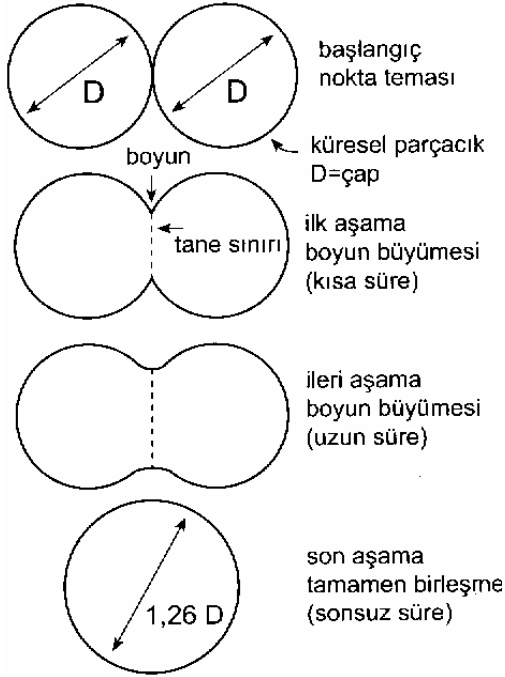
küresel iki parçacığı ele alınacak olursa, ham parça içinde sıkıştırmanın etkisiyle her bir parçacık üzerinde bu tür birçok temas noktası meydana gelir.



Şekil 4.18. Parçacıklar arasındaki sinter bağının atomik düzeyde gösterimi [99]

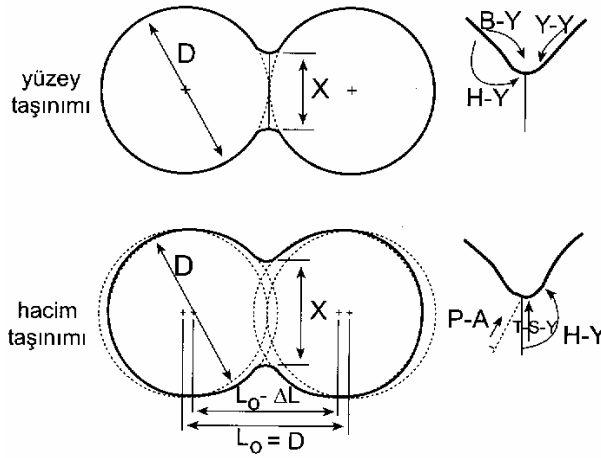
Sinterlemenin ilk aşaması her parçacık üzerinde birkaç noktada boyun büyümesi ile tanımlanır. Fakat boyunlar birbirinden bağımsız olarak büyür. Burada boyun büyüklüğü oranı X/D , 0,3'ten azdır ve sinterleme çekmesi L/L_0 genellikle %3'ün altındadır. Bu noktada teorik yoğunluğun %92'sine kadar ulaşmak mümkündür. Boyun zamanla dış bükey bölgedeki atomlar tarafından doldurulan bir iç bükeyliği temsil eder. Boyun büyüdükçe kavis azalır ve işlem yavaşlar. Sinterlemenin ara aşamasında gözenekler yuvarlaklaşır, fakat gözenekler etrafındaki kavis kütle transferleri için itici güç oluşturmaya devam ederek iç bükey bölgeleri doldurur. Her ne kadar gözenekler yuvarlaklaşıp düzgün hale gelse de hala dışa açıktırlar. Her temas noktasında bir tane sınırı büyür ve katı-buhar ara yüzeyinin yerini alır. Sinterlemenin ilerlemesiyle taneler büyür ve gözenekler küçülür. Sinterlemenin son aşamasında gözenekler kapalı ve küreseldir. İki parçacığın tamamen birleşerek çapı başlangıç çapının 1,26 katı olan tek küresel parçacıklar meydana gelir. Preslenmiş ham parça içinde her parçacığın birçok komşusu olduğundan her parçacığın birkaç değişik noktasında bu tür bağ oluşur. Tam yoğunluğa yaklaşılrken tane sınırı hareketini zorlaştıran gözenek sayısı azaldığından tane büyümesi hızlanır. Buna ilaveten içinde hapsolmuş gaz varsa gözenekler tamamen ortadan kaldırılamaz. Bu

nedenle, pek çok sinterlenmiş malzemede erişilebilecek bir üst yoğunluk sınırı vardır ve bu değer %100 teorik yoğunluğun altındadır. Sinterleme işlemi vakumda yapıldığı takdirde, gözeneklerde gaz kalmadığından tam yoğunluğa erişilebilir [99].



Şekil 4.19. Sinterleme aşamalarının şematik gösterimi [99]

Sinterlemenin oluşabilmesi için atomların yeterli yüzey yayınına sahip olması gerekir. Atomik yayınma sıcaklığın bir fonksiyonu olduğundan, sinterleme önemli derecede sıcaklığa bağlıdır [7]. Birbirleriyle temas halindeki tozlar, sıcaklığın etkisiyle atomik yayınmaya ve dolayısıyla kütleli olarak taşınmaya başlar. Kütle taşınım mekanizmaları, itici güçlere karşılık olarak kütle akışının nasıl olduğunu belirler. Hacim ve yüzey taşınımı olmak üzere iki türlü kütle akışı vardır (Şekil 4.20). İkisi arasındaki fark atomların boyun bölgesini nereden doldurmaya başlaması ile ilgilidir. Yüzey taşınımında atomlar boyun bölgesi yakınındaki gözenek yüzeylerinden başlayarak doldurur. Hacim taşınımı ise tane sınırlarındaki atomları kullanarak bunları boyun bölgesinde yeniden konumlar.



Şekil 4.20. İki tip sinterleme mekanizması

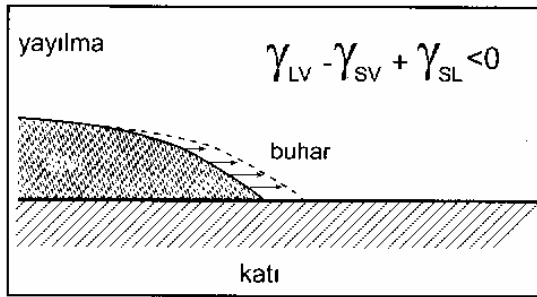
(Yüzey taşınım mekanizması: B-Y=buharlaştırma-yoğuşma,
Y-Y=yüzey yayınımları, H-Y=hacim yayınımları;
Hacim yayınım mekanizması: P-A=plastik akış,
T-S-Y=tane sınırı yayınımları, H-Y= hacim yayınımları)

Yüzey taşınımı çekme veya yoğunluk artışı olmayan boyun büyümesi içerir. Yüzey taşınım kontrollü sinterlemede, yüzey yayınımları (difüzyonu) ve buharlaşma-yoğuşma en önemli katkı yapan iki olaydır. Birçok malzemenin düşük sıcaklıkta yapılan sinterlemesinde yüzey yayınımları baskındır. Buharlaştırma-yoğuşma, kurşun içeren düşük kararlı malzemelerin sinterlenmesi dışında çok önemli değildir. Buna karşılık, hacim taşınım kontrollü sinterleme çekmeye neden olmaktadır. Kütle, tane sınırından bazen de tane içinden gelir ve boyun yanındaki gözeneğin yüzeyinde toplanır. Hacim taşınım mekanizmaları; hacim yayınımları, tane sınırı difüzyonu, plastik ve viskoz akışı kapsar. Özellikle, preslenmiş tozlarda plastik akış ısıtma sırasında son derece önemlidir. Ancak toz tepe sıcaklığına ulaştığında plastik akış önemini kaybeder. Bunun tersine, cam ve plastikler gibi amorf malzemeler viskoz akış ile sinterlenir. Metallerde viskoz akış tane sınırında sıvı fazların olması durumunda mümkündür. Kristalli malzemelerin yoğunlaşmasında tane sınırı yayınımları oldukça önemlidir ve pek çok metalin yoğunlaşmasında ana yayınım mekanizmasıdır [99]. Her iki taşınım mekanizmasında da blok parça yüzey alanı, boyun büyümesiyle azalmasına rağmen, sinterleme sırasında esas değişiklik yoğunlukta veya çekmede meydana gelir. Genellikle hacim taşınım mekanizması son sinterleme bölgesinde aktif olup çekme ve yoğunlaşma bu mekanizmada gerçekleşir. Bu mekanizmalar malzemeye, tane

boyutuna, sinterleme devresine, sıcaklığa ve diğer bazı işlem parametrelerine bağlıdır [111].

4.5.2. Sıvı fazlı sinterleme

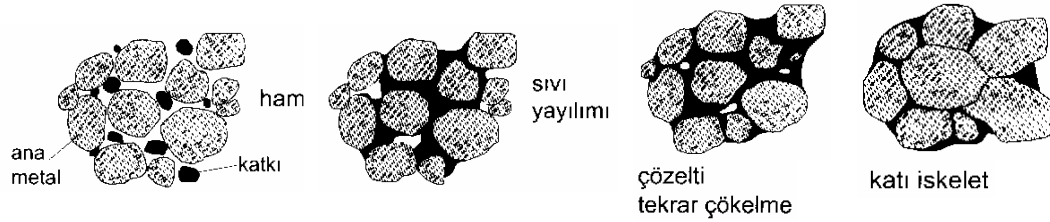
Sinterleme sırasında sıvı faz oluşumu sinterleme hızını büyük ölçüde artırır. Esas olarak sıvı faz taneleri birbirine bağlayan ve içinde hızlı yayılımın olduğu lehimi oluşturur. Sıvı faz sinterleme için genel gereksinim ıslatmadır. Şekil 4.21’de gösterildiği gibi sıvı faz katı tanelerin üzerine yayılmalıdır. Islatan bir sıvı, küçük temas açısına (θ) sahiptir. Temas açısı yüzey enerjisinin dengesi ile tanımlanır. Burada γ_{sv} katı-buhar yüzey enerjisi, γ_{sl} katı-sıvı yüzey enerjisi, γ_{lv} ise sıvı-buhar yüzey enerjisidir. Islatan bir sıvı filmi yoğunlaşmaya yardımcı olan ve kılcal kuvvet olarak tanımlanan yüzey gerilmesi sağlar. Genellikle ıslatma katının sıvı içinde çözündüğü durumlarda gerçekleşir.



Şekil 4.21. Sıvı fazlı sinterlemede katı tanelerin sıvı ile ıslatılması [99]

Sıvı fazlı sinterlemedeki yoğunlaşma aşamaları Şekil 4.22’de gösterilmiştir. Başlangıçta ısıtma sırasında taneler katı hal sinterlemesi ile birbirine bağlanır. İlk sıvı oluştuğunda, tanelerin yeniden düzenlenmesi ile hızlı bir yoğunluk artışı olur. Oluşan sıvı katıyı ıslatarak oluşmuş olan katı bağlarını çözer ve yeniden düzenlenmeyi sağlar. Bundan sonra, çözelti tekrar çökelme olarak bilinen işlemde, sıvı katı atomların taşıyıcısı olur. Bu aşamada daha küçük tane kütleleri sıvı içinde çözünür, sıvı içinden yayılır ve daha sonra büyük tanelerin üzerine çöker. Katı tane çözünürlüğü tane boyutu ile ters orantılıdır. Dolayısıyla, öncelikle küçük taneler sıvı

faz içinde çözünür. Zamanla tane sayısı azalır ve tane boyutu artar. Son olarak temas eden taneler arasında kararlı boyunlar oluşur ve son yoğunlaşma katı iskeletin sinterlenmesiyle tamamlanır.



Şekil 4.22. Sıvı faz sinterlemenin kavramsal aşamaları [99]

4.5.3. Sinterleme atmosferleri ve etkileri

Sinterleme atmosferlerinin en önemli görevi yüksek sıcaklıktaki kimyasal tepkimeleri kontrol etmektir. Sinterleme için gerekli bir atmosfer prensip olarak parçaların ve fırının oksitlenmesini önlemek, yüzey oksitlerini indirgemek, fırında buharlaşan yağlayıcı gazlarını dışarı atmak ve demir karbon alaşımlarında olduğu gibi blok parçaların bileşimini kontrol etmek için kullanılır. Genel olarak sinterleme atmosferi olarak hava, azot argon, oksijen, hidrojen ve çeşitli gaz karışımları kullanılır. Önemli olan atmosferdeki safsızlık derecesidir ve sinterleme sırasında kimyasal tepkimeleri kontrolü için çok önemlidir. Sıklıkla kullanılan atmosfer koşulları şunlardır [99]:

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

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

1. *Yerinde üretim*: Bu yöntemde fırının yanına yerleştirilen düzenek yardımıyla atmosfer üretilir. Bu metot ekzotermik, endotermik ve kırılmış amonyak atmosferlerinin üretimi için kullanılır. Ekzotermik atmosfer bir hidrokarbon gazının hava miktarının kontrol edildiği bir refrakter yanma hücresinde yakılmasıyla üretilir. Endotermik atmosfer ise propan ve doğal gaz gibi hidrokarbonların reaksiyonuyla bir jeneratör içinde üretilir. Endotermik atmosferler daha çok karbon çeliklerinde kullanılır.

2. *Sentetik atmosferler*: Genellikle fırının dış kısmında depo edilmiş kütle gazlar gereken kompozisyonu gerçekleştirecek karıştırma ünitesine bağlanır. Bu metot, genellikle azot ve hidrojen gazları için kullanılır. Eğer karbon kontrolü gerekliyse bu karışıma az miktarda doğal gaz ve propan gibi hidrokarbonlar ilave edilir. Azot ve hidrojenin oranları %100' e varan oranlarda değiştirilebilir. Elde edilen atmosfer, karıştırma ünitesinden fırına gönderilir.

3. *Dubleks (çift fazlı) sistemler*: Sentetik atmosfere çok benzerdir. Tüpte depo edilmiş azot gazı bir veya daha fazla gazla istenen atmosfer bileşimini verecek şekilde karıştırılır. Bu sınıftaki iki temel atmosfer kırılmış amonyakla azot ve endotermik gazla azottur [113]. Sinterlemede kullanılan atmosferler, parçaları oksitlenmekten koruduğu gibi, mevcut oksitleri de indirger ve atmosferin bileşimine göre karbürizasyon veya dekarbonizasyon meydana getirir. Sıcaklık ve son karbon konsantrasyonu karbürizasyon uygulamaları için bilinmesi gerekli parametrelerdir. Eğer karbon miktarı kontrol edilmezse fazla karbon atmosferle reaksiyona girerek kaybedilir veya fazla karbürizasyon meydana gelir. Karbon miktarı, su buharı-hidrojen, karbondioksit-karbon monoksit ve metan-hidrojen oranları ile belirlenir.

Uzun sinterleme zamanlarına ve yüksek sinterleme sıcaklıklarına izin verilmezse denge oranları daha iyi olan atmosferler gerekir [114].

4.6. Bitirme İşlemleri

TM tekniklerinin en önemli üstünlüğü, hızlı üretim çevrimleriyle yüksek hassasiyet elde etmek için yüksek performanslı malzemelerde karmaşık net şekilleri oluşturma yeteneğidir. Ancak, toz preslenip sinterlendikten sonra ürünün son şeklini alması için ek işlemler gerekebilir. Bitirme işlemleri delik delme, vida açma, bileşenlerin montajı, boyut ayarlama için yeniden presleme, kaba yüzeyleri düzgünleştirme, çapakların alınması, karbürleme yoluyla yüzeyi sertleştirme, ısıl işlem ile mukavemetlendirme, yorulma ömrünü iyileştirmek için yüzeyi bilyalı dövme ve korozyon önleyici kaplama, emprenye ve gözenek doldurma (infiltrasyon) şeklindedir. Bitirme işlemlerinin başarılı bir şekilde yapılması, amaçlanan çalışma koşulları için parçaya yeni biçim vererek değer kazandırır [8, 99].

Sinterleme sonrası *mekanik deformasyon işlemleri* yeniden presleme, boyutlandırma, damgalama ve yüzey yoğunlaştırma olarak bilinir. Bu yöntemler sıcak presleme, dövme veya ekstrüzyon gibi klasik yoğunlaştırma basamaklarından daha az plastik deformasyon içermektedir. Yeniden presleme büyük şekil değişiklikleri olmadan son boyutları ve yoğunluğu ayarlamak için yapılan yeniden düzenleme işlemidir. Yataklar, dişliler ve elektronik bileşenler gibi hassas parçalardaki boyutlandırma ve yüzeye yakın gözenekleri kapatmak için uygulanan bitirme işlemlerini kapsamaktadır.

Talaşlı imalat işlemleri olarak bilinen delme, taşlama, frezeleme, honlama, raybalama, kılavuz çekme, tornalama, planyalama gibi teknikler toz metalurjisiyle orijinal şekillendirilmesi zor olan vida açma, oyuk, yiv vb. geometrilerin oluşturulması ile ürünlerin boyutsal sapmaları gidermek ve yüzey kalitesini iyileştirmek amacıyla kullanılır [99].

Isıl işlemler sinterlemeden sonra fazları, mikroyapıyı ve alaşım elementlerinin dağılımını düzenlemek için yapılır. Isıl işlemlerin en önemli kazancı toz metal ürünlerin aşınma ve korozyon dayanımı ile sertliğini artırmasıdır. Sinterlemeden sonra metallerin yaklaşık olarak üçte ikisine uygulanan ısıtıl işlemlerden bazıları şunlardır [99]:

- Sinterlenmiş çelikler çözündürülür. Hızlı soğutulur ve menevişlenir.
- Sinterlenmiş alüminyum alaşımları çökelti sertleşmesi çevrimine tabi tutulur.
- Titanyum alaşımları kristal çeşitlerinin karışımını oluşturmak için ısıtıl işleme tabi tutulur.
- Takım çelikleri yüksek sertlik elde etmek için ısıtıl işleme tabi tutulur.
- İntermetalikler sık sık düzenli yapı oluşumu için ısıtıl işlem gerektirir.
- Şekil bellekli alaşımlar istenilen şekil için ısıtıl işleme ihtiyaç duyar.

Emprenye ve gözenek doldurma işlemleri; TM teknolojisinin ayrılmaz bir parçası ve doğal karakteristiği olan gözeneklilikle ilgilidir. TM üründeki gözenekleri yağ, polimer veya metalle doldurarak özel mamüller oluşturmak mümkündür. Emprenye ve infiltrasyon olmak üzere iki kategoride gerçekleştirilir.

Emprenye işlemi: Sinterlenmiş bir TM parçanın gözeneklerine, yağ veya başka bir sıvı emdirilmesi olarak tanımlanır. Emprenye işleminin kullanım alanlarına; yaygın mamuller, yağ emdirilmiş yataklar, dişliler ve benzer parçalar ile alternatif bir uygulama olarak, parçalara polimer reçine emdirilerek, gözenek boşluklarının sıvı formda doldurulması ve katılaştıktan sonra basınç altında sızdırmazlık özelliğine sahip bir parça elde edilmesi örnek olarak verilebilir [8].

İnfiltrasyon: TM parçanın gözeneklerinin erimiş bir metalle doldurulması işlemidir. İnfiltrasyon işleminde, dolgu metalinin erime sıcaklığı, TM parçanınkinin altında olmalıdır. Sinterlenmiş parça ile temas halindeki dolgu metalinin ısıtılmasını ve dolgunun kılcal etkiyle gözeneklere dolmasını içerir. Oluşan yapı, göreceli olarak gözeneksizdir ve infiltre edilmiş parça daha üniform bir gözenekliliğe sahip olup tokluğu ve dayanımı artmıştır. Örneğin; demir TM parçalara bakır infiltrasyonu bu işlemin bir uygulamasıdır [8].

5. TALAŞLI İMALAT VE İŞLENEBİLİRLİK

Talaşlı imalat, 200 yılı aşkın bir süredir yoğun olarak araştırılmakta olup 1900’lü yılların ortalarına gelindiğinde, işlemenin fiziksel mekaniği analitik olarak çalışılmaya başlanmıştır. 1940-50 arasındaki zaman dilimi, işleme araştırmalarının “Altın Çağı” olarak bilinmektedir ve metal kesme mekaniği temelinin talaş olduğu bilgisinin geliştiği dönemdir [115]. Döküm, dövme, haddeleme ve diğer şekillendirme yöntemleriyle üretilmiş mühendislik malzemelerinin kullanıma hazır hale getirilmesi için çoğunlukla talaşlı imalat işlemine maruz kalmaları gerekir. Talaşlı imalat işleminde, iş parçasını istenilen geometriye getirmek için, parça üzerindeki fazlalıklar uygun takım tezgahı ve kesici takım kullanılarak istenilen boyutlar ve yüzey kalitesi sağlanır [116].

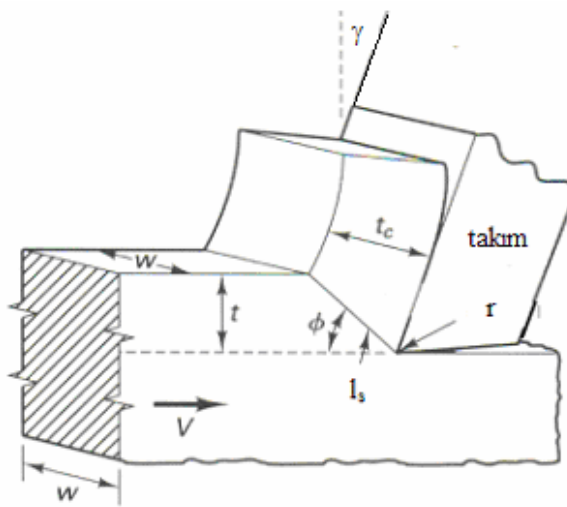
Talaşlı imalat işleminin maliyeti, endüstriyel ürünlerin maliyetinde önemli bir orana sahip olduğu için iş parçasının işlenebilirlikleri üzerine ve kesici takımların kesme performanslarını optimize etmek için çok sayıda çalışma yapılmıştır. Maliyetin düşürülmesine yönelik yapılan çalışmaların sonucu olarak talaşlı imalat işlemini azaltmak için çeşitli yöntemler geliştirilmiş olmakla birlikte bu yöntemler oldukça sınırlıdır ve ayrıca talaşlı imalat ile elde edilebilecek iyi bir yüzey kalitesi birçok parça için gereklidir [117].

İşleme, son zamanlarda net şekli oluşturma yöntemlerindeki gelişmelere rağmen halen büyük bir endüstriyel faaliyet olarak devam etmektedir. İşleme sistemi, büyük ölçüde kesici takım malzemelerine bağlı olarak verilen kesme hızı ile kesici takım, iş parçası ve takım tezgahının birleşimidir. Talaşlı üretim yapanlar sürekli olarak, çok hızlı kesme hızlarında büyük kesme derinlikleriyle kaba kesmeler için hızlı talaş kaldırma oranını sağlayacak ve bitirme pasolarıyla ilişkili olan gerekli ölçü tamlığı ve yüzey kalitesini oluşturacak kesici takım-takım tezgahı-iş parçası kombinasyonu bulmaya çalışmaktadır. Bunu başarmak için kesici kenarlarda oluşan zor şartlara dayanabilen kesici takım malzemelerinin gelişmesi üzerine çalışmaktadırlar. Kesici takım malzemelerinin geliştirilmesini gerektiren diğer faktörler:

- Düşük imalat maliyeti ve yüksek verimlilik için artan talep,
- İşlenmesi zor olan yeni yapısal alaşımların sürekli gelişimi,
- Yüksek güvenilirlik ve tahmin edilebilirlik gerektiren sistemler ve otomatik ve sayısal kontrollü takım tezgahlarının kullanımının artmasıdır [118].

5.1. Metal Kesme Mekanikği

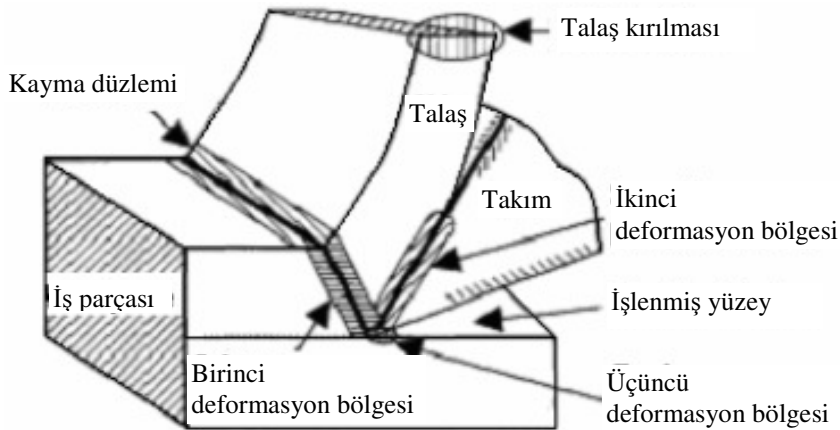
Metal kesme mekanikği şu ana kadar tam olarak anlaşılamamış olup endüstri, üniversite ve laboratuvar araştırmalarının işleme sürecinin modellenmesi üzerindeki çalışmaları halen devam etmektedir [119]. Talaşlı imalat işlemi gerçekte üç boyutlu ve oldukça karmaşık olduğu için metal kesme mekanikğinin tanımlanmasında genellikle iki boyutlu ortogonal (dik) kesme modeli kullanılır (Şekil 5.1). Bu model basit olmasının yanı sıra talaşlı imalat mekanikğini yeterli doğrulukta tanımlar [116]. Dik kesme işleminde, kesici takım kenarı işparçası-takım hareket yönüne göre dik olarak hareket eder. Bu modele göre, iş parçasının kesici takımı zorlamasıyla kayma düzleminde iş parçasının kayma gerilmesi değerin aşılmamasıyla talaş oluşumu gerçekleşir. Talaşlı imalat işleminin mekanikği ve talaş oluşumu üzerine yapılan analizlerde genellikle iş parçası olarak metaller dikkate alınmıştır. Bununla birlikte, metal dışı olan malzemelerin işlenmesinde de benzer kurallar uygulanabilir [8].



- t: deforme olmamış talaş kalınlığı
- t_c : deforme olmuş talaş kalınlığı
- w: iş parçası genişliği
- r: kesici takım uç radyusu
- l_s : kayma düzlemi uzunluğu
- ϕ : kayma düzlemi açısı
- γ : kesici takım talaş açısı
- V: işparçası ilerleme yönü

Şekil 5.1. Dik kesme modeli [116]

Gerçekte ise talaş oluşumu ince bir bölgede gerçekleşir. Talaş oluşumu plastik deformasyonun önemli derecede rol oynadığı bir işlemdir. Talaşlı imalat işleminde talaş oluşumu, iş parçasının kesici takım önündeki bölgesel deformasyonu ile gerçekleşir [8]. Dik kesme işlemi sırasında oluşan işleme sürecinde üç deformasyon bölgesi oluşmakta olup bunlar Şekil 5.2’de görülmektedir. Birincisi, iş parçasının kesici takım önünde hareketiyle oluşan kayma düzleminde meydana gelen deformasyon yani birinci deformasyon bölgesidir [120]. İş parçası ve kesici takım arasındaki nispi hareket sonucu iş parçasında oluşan gerilme iş parçasını birinci deformasyon bölgesinde plastik deformasyona uğratarak talaş oluşumunu gerçekleştirir. İkincisi, sürtünme kuvveti ve takım-talaş teması boyunca meydana gelen basınçtan kaynaklanan takım-talaş ara yüzeyindeki deformasyon, ikinci deformasyon bölgesidir. Birinci deformasyon bölgesinde oluşan talaş kesici takımın talaş yüzeyi üzerinden geçerken basınca bağlı oluşan yapışma sonucu ikinci defa deformasyona uğrar ve kesme bölgesinden atılır. İşleme sürecinin anlaşılmasında ikinci deformasyon bölgesinin önemi büyüktür. Takım-talaş ara yüzeyindeki bu bölgenin kalınlığı kesme işleminin analizinde önemli bir faktördür. Bu bölgenin kalınlığı gerilme, gerinim ve sıcaklıktan çok fazla etkilenir. Bu nedenle ikinci deformasyon bölgesi, maksimum kayma gerilmesi, maksimum kayma gerinim oranı ve talaştaki sıcaklığın en yüksek olduğu yer olarak varsayılmaktadır. Üçüncüsü, işlenen yüzeye kesici takım yan yüzeyinin teması sonucunda oluşan sürtünmenin etkisiyle meydana gelen deformasyondur ki bu da üçüncü deformasyon bölgesi olarak adlandırılır [121].



Şekil 5.2. Plastik deformasyon bölgeleri [120]

5.2. Takım-Talaş Ara Yüzeyi ve Yığıntı Talaş Oluşumu

Talaşlı imalat işlemi esnasında birinci deformasyon bölgesinden ayrılan talaş kesici takım-talaş yüzeyinden geçerek kesme bölgesinden atılır. Talaşın bu bölgeden geçerken kesici takım ile etkileşimi ve davranışı talaşlı imalat performansını önemli ölçüde etkiler. Çoğu analizlerde bu bölgede kesici takım ve talaş arasında klasik sürtünme olduğu kabul edilmiştir fakat bu yaklaşımın genellikle uygun olmadığı görülmüştür. Kesici takım, talaş ve ani durdurma ile elde edilen numuneler üzerinde yapılan metalurjik incelemelerde, bu bölgede çoğunlukla klasik sürtünmenin olmadığı ve yapışma olduğu sonucuna varılmıştır [122]. Bu bölgede yüksek basınç ve sıcaklıktan dolayı iki yüzey birleşerek metalin kayma hareketini durdurur fakat takım-talaş arasındaki hareket devam ettiğinden dolayı ara yüzeyde akma bölgesi oluşur. Hareketin şekli çoğunlukla kesilen iş parçası malzemesinin özelliğine ve kesme parametrelerine bağlıdır. Bu bölge *akma bölgesi* veya *ikinci deformasyon bölgesi* olarak adlandırılır (Şekil 5.2).

Takım-talaş ara yüzeyinde yapışma sonucu akma bölgesi daima kesici takım yüzeyinde oluşmaz. Alternatif bir özellik olan yığıntı talaş, talaşlı imalat işlemlerinde sıkça görülür. Çoğunlukla orta seviyedeki kesme hızlarında görülen yığıntı talaş, yapılarında birden fazla faz bulunduran alaşımların işlenmesinde, pekleşen iş parçası malzemesinin kesici takım talaş yüzeyinde ve kesici uç etrafında kümelenerek talaşın kesici takım ile doğrudan temasını engeller. Yığıntı talaş oluşumu ile yoğun ve hızlı kayma deformasyonu takım yüzeyinden yığıntı talaş yüzeyine taşınır [123].

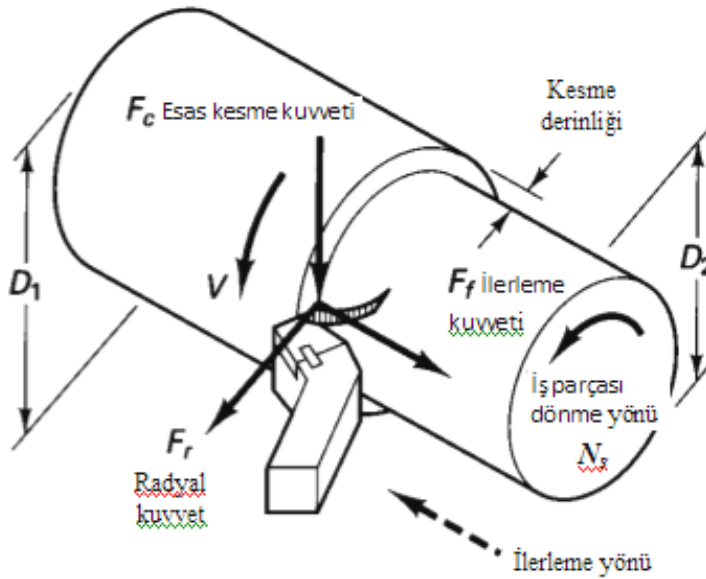
Yığıntı talaş oluşumunun gerçekleştiği sıcaklık iş parçasının yeniden kristalleşme sıcaklığının altındadır. Yığıntı talaşın yapısı yeniden kristalleşmeye maruz kalmış akma bölgesinin yapısından tamamen farklıdır. Yığıntı talaş dinamik bir yapıya sahiptir. Metal kesme işlemi esnasındaki zor şartlarda sertleşen katmanların kümelenmesiyle oluşur ve belirli bir yüksekliğe ulaştıktan sonra talaş akışının neden olduğu kayma kuvvetlerine daha fazla dayanmayacağı için talaş veya iş parçası vasıtasıyla kesici uçtan uzaklaşır. Yığıntı talaş, kesici uçtan uzaklaştırılması ile tekrar oluşmaya başlar ve bu şekilde periyodik olarak oluşumu ve kırılması devam eder.

Yığıntı talaşın kesici takım yüzeyinden atılması esnasında bir kısım kesici takım malzemesi de yığıntı talaşla birlikte kopup gidebilir [124]. Bazı durumlarda yığıntı talaş kesici uç üzerinden iş parçası malzemesine doğru çıkıntı oluşturarak talaş derinliğini artırır. Bu çıkıntı düzensiz bir yapıya sahip olacağı için yüzey pürüzlülüğünü artıracaktır [125].

Yığıntı talaşın şekli, özellikle kesici takım talaş açısını ve talaş derinliğini etkiler. Yığıntı talaş, talaşlı imalat işleminde çeşitli durum ve biçimlerde görülen ve genelde olumsuz kabul edilen bir faktördür ve oluştuğu kesme şartları değiştirilerek çoğunlukla oluşumu engellenebilir [124].

5.3. Talaşlı İmalat İşleminde Kesme Kuvvetleri

Talaş kaldırma işlemi esnasında oluşan kesme kuvvetleri, ısı oluşumu, takım ömrü, işlenen yüzeyin kalitesi ve iş parçasının boyutları üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Kesme kuvvetleri aynı zamanda takım tezgahlarının, kesici takımların ve gerekli bağlama kalıplarının tasarımında da kullanılır [125]. Tornalama işlemi esnasında oluşan kuvvetler Şekil 5.3’de şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 5.3. Tornalama işleminde kesme kuvvetleri [126]

Burada kesme kuvvetinin üç bileşeni mevcuttur.

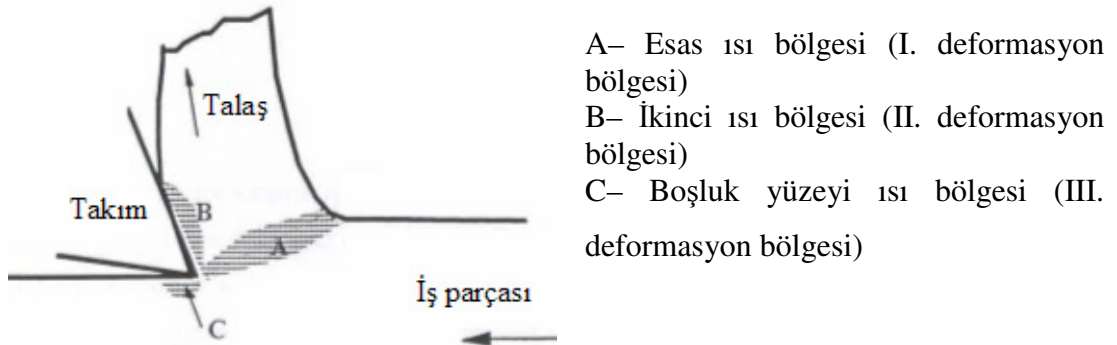
- i. Esas kesme kuvveti (F_c): Kesme hızı yönünde etki eder . En büyük kuvvet olup metal kesme işleminde harcanan gücün genelde %99'una karşılık gelir.
- ii. İlerleme kuvveti (F_f): Kesici takımın ilerlemesi yönünde etkiyen kuvvettir. Genellikle esas kesme kuvvetinin yaklaşık %50'si kadardır.
- iii. Radyal (pasif) kuvvet (F_r): İşlenen yüzeye dik etkiyen kuvvettir. Bu kuvvet ise genellikle ilerleme kuvvetinin yaklaşık %50'si kadardır [126].

Bileşke kuvvet bu üç kuvvetin vektörel olarak toplanması ile elde edilir ve Eş. 5.1 yardımıyla hesaplanır:

$$F = \sqrt{F_c^2 + F_f^2 + F_r^2} \quad (5.1)$$

5.4. Talaşlı İmalat İşleminde Isı ve Sıcaklık

Talaşlı imalat işleminde kullanılan güç genellikle ısıya dönüşerek talaşın, iş parçasının ve kesici takımın sıcaklığını artırır. Sıcaklık artışı, metal kesme işlemi esnasında oluşan ısı ve aynı zamanda bu ısının uzaklaştırılması durumuna bağlıdır [125]. Oluşan ısı sonucu sıcaklık artışı kesici takım performansını ve iş parçası kalitesini etkiler [124]. Kesme bölgesinde ısı üretme kapasitesine göre ısı oluşturan üç bölge vardır (Şekil 5.4).



Şekil 5.4. Kesme bölgesinde ısı oluşumu [127]

Bu bölgeler:

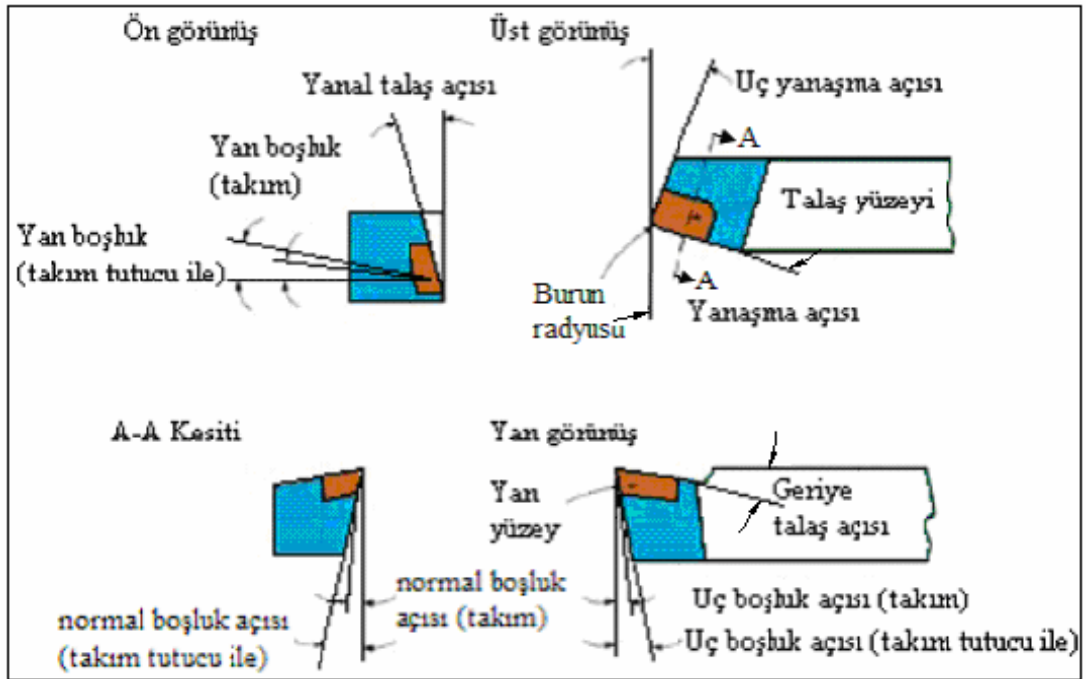
- A- Kayma düzlemi; buradaki plastik deformasyon önemli bir ısı kaynağı olup oluşan ısıнын çoğu talaşa aktarılır.
- B- Takım-talaş ara yüzeyi temas bölgesi; buradaki ilave plastik deformasyon olur ve kayma hareketinden dolayı ısı oluşumunda önemli derecede etkilidir.
- C- Takım yan yüzeyi, burada yeni oluşan iş parçası yüzeyinin takım yüzeyine sürtünmesiyle ısı oluşur. Özellikle bu sürtünme yan yüzey aşınması ile artar [126].

Isının takım aşınması ve takım ömrü üzerinde doğrudan bir etkisi vardır ve kesme hızının artışı sınırlandırır. Oluşan ısıнын çoğu kesme bölgesinden talaş, iş parçası, kesici takım ve ortam tarafından uzaklaştırılır, bunların her biri tarafından uzaklaştırılan ısıнын miktarı iş parçası malzemesi, kesme parametreleri, kesici takım malzemesi, takım geometrisi ve kesme şartlarıyla değişir. Kesme hızı, kesme sıcaklığı üzerinde çok önemli bir etkiye sahiptir. Kesme hızının artmasıyla metal kesme işlemindeki deformasyon ve sürtünme için kullanılan birim zamandaki enerji artar ve bu da ısıyı ve dolayısıyla sıcaklığı artırır [125]. Aşırı sıcaklık, kısa takım ömrü ve kesme hızını sınırlandırmanın ana sebebidir. Kesici takım malzemelerinin geliştirilmesi büyük bir oranda yüksek sıcaklık etkilerine dayanabilmeleri etrafında odaklanmıştır. Kesme bölgesindeki sıcaklık büyük oranda takım ile talaş arasındaki temasa, kesme kuvvetlerinin büyüklüğüne ve iş parçası ve kesici takım arasındaki sürtünmeye bağlıdır. Bu durumda düşük kesme hızları iş parçasına iletilen ısıyı ve dolayısıyla sıcaklığı artırabilir. Yüksek kesme hızları enerjinin çoğunun talaşla atılmasının ve kesici takım ve iş parçasına az miktarda ısı iletilmesini sağlar. Metal kesme işleminde oluşan ısıнын çoğu kesme bölgesinden ideal olarak talaşla uzaklaştırılır. Talaştaki ısı, kesici takımı talaş ve takım arasında temas olduğu sürece etkiler. Isının çoğu kayma bölgesinden kaynaklanır ve bu nedenle takım ve talaş arasındaki temasın ölçüsü performansı etkiler. Küçük talaş açılarından kaynaklanabilen küçük kayma açıları iş parçasına iletilen ısı miktarını artırabilir [124].

5.5. Kesici Takım

5.5.1. Kesici takım geometrisi

Talaşlı imalat işleminde etkin bir şekilde kesme işleminin yapılabilmesi için kesici takım uygun geometriye sahip olmalıdır. Çeşitli talaşlı imalat işlemleri için kesici takım geometrileri de farklılık gösterir. Kesici takımlar tek noktadan kesme işlemi yapan ve çok noktadan kesme işlemi yapan kesici takımlar olmak üzere genelde iki kategoriye ayrılır. Bununla birlikte, bütün talaşlı imalat işlemlerinde talaş oluşum mekanizması temelde aynı olduğu için tek noktadan kesme işlemi yapan kesici takımlara uygulanan kurallar, genelde çok noktadan kesme işlemi yapan kesici takımlara uygulanan kurallar ile aynıdır. Tornalama işleminde genelde tek noktadan kesme işlemi yapan kesici takımlar kullanılır [3]. Şekil 5.5'te tek noktadan, sağ yönlü kesme işlemi yapan (sağ yan) bir kesici takımın geometrisi görülmektedir.



Şekil 5.5. Tek noktadan kesme yapan bir kesici takımın geometrisi [128]

5.5.2. Kesici takım malzemeleri

Talaşlı imalat işlemi esnasında yüksek sıcaklık ve gerilmeler nedeniyle kesici takımların etkin bir şekilde uzun süre kesme işlemi yapabilmesi için kesici takım malzemeleri aşağıdaki özelliklere sahip olmalıdır [124]:

- Yüksek sertlik ve sıcak sertlik,
- Yüksek tokluk,
- İş parçasına karşı kimyasal olarak asallık,
- Oksidasyon ve kimyasal olarak çözünmeye karşı kararlılık,
- Isıl şoklara karşı direnç.

Endüstriyel alanlarda yaygın olarak kullanılan kesici takım malzemeleri aşağıda kısaca özetlenmiştir.

Yüksek hız çeliği

Yüksek hız çeliği, karbon ve düşük alaşımlı çeliklere nazaran yüksek sıcaklıklarda sertliğini koruyabilen yüksek alaşımlı bir takım çeliğidir ve günümüzde kullanılan en önemli takım malzemelerinden biridir. Matkap, kılavuz, freze çakıları ve tığlar gibi karmaşık geometriye sahip kesici takımların üretiminde yaygın olarak kullanılırlar. Yüksek hız çeliği kesici takımlar, sementit karbür ve seramik gibi daha sert kesici takımlardan daha iyi tokluk özellikleri sergilerler. Taşlamayla istenilen geometriye kolayca getirilebildikleri için, imalatçılar tarafından tek noktadan kesme işlemi yapan kesici takım olarak da kullanılırlar. Yüksek hız çeliği takımlar, özellikle matkaplar, kesme performanslarının önemli ölçüde artırılması için TiN ile kaplanırlar [123].

Sementit Karbürler

Sementit karbür kesici takımlar ilk olarak tungsten karbür (WC) ve kobalt (Co) parçacıklarından toz metalurjisi yöntemleriyle üretilmişlerdir. Sert WC parçacıklarından dolayı dökme demir ve çelik dışı metallerin işlenmesinde yüksek hız çeliğinden daha yüksek kesme hızlarında etkin bir şekilde kullanılmıştır [123].

Çelik ve WC-Co arasındaki güçlü bir kimyasal reaksiyondan dolayı takım-talaş ara yüzeyinde adhezyon ve difüzyon vasıtasıyla özellikle çeliklerin işlenmesi esnasında hızlı krater aşınması olduğu için, WC-Co sementit karbür kesici takımlara TiC ve TaC ilave edilerek krater aşınma direnci önemli derecede iyileştirilmiştir. WC-TiC-TaC-Co kesici takımlar çeliğin işlenmesinde kullanılabilir [8, 123].

İki tür sementit karbürün genel özellikleri benzer olup aşağıdaki gibidir:

- Yüksek basma dayanımı, düşük veya orta seviyede çekme dayanımı,
- Yüksek sertlik (90-95 HRA),
- Yüksek sıcak sertlik,
- İyi aşınma direnci,
- Yüksek ısı iletkenlik,
- Yüksek elastikiyet modülü,
- Yüksek hız çeliğinden düşük tokluk [123].

Çelik dışı malzemelerin işlenmesinde de kullanılan sementit karbür kesici takımlar alüminyum, pirinç, bakır, magnezyum, titanyum ve dökme demirin işlenmesinde kullanılır. Çelik türü malzemeler için olan sementit karbür ise düşük alaşımlı, paslanmaz ve diğer alaşımlı çeliklerin işlenmesinde kullanılır. Bu tür kesici takımlarda WC ile birlikte TiC ve/veya TaC'de kullanılır. Çoğunlukla %10-25 oranında TiC ve TaC aynı oranda WC azaltılarak ilave edilir. Bu yapı, bu tür kesici takımlarda çeliğin işlenmesinde krater aşınma direncini artırır fakat çelik dışı malzemelerin işlenmesinde hızlı yan yüzey aşınmasına sebep olur [123].

Kaplamalı sementit karbür

Sementit karbürlerin aşınmaya dirençli TiC, TiN ve/veya Al_2O_3 gibi malzemelerle kaplanması kesici takım alanındaki en önemli gelişmelerden biri olarak kabul edilir. Kimyasal (CVD) veya fiziksel (PVD) buhar çökeltme yöntemleriyle sementit karbür altlık üzerine birkaç mikron kalınlığında tek veya çoklu katman olarak kaplanan bu malzemeler, sementit karbür kesici takımın performansını önemli ölçüde artırır [8].

Kaplamalar, geliştirildikleri ilk zamanlarda tek katman olarak uygulanmıştır fakat son zamanlarda çok katlı kaplamalar geliştirilmiştir. WC-Co kesici takıma, adhesiv olarak iyi birleşmelerinden ve birbirlerine yakın ısı iletkenlik katsayılarından dolayı çoğunlukla TiN veya TiCN uygulanır. Bu ilk katmanın üzerine TiN, TiCN ve Al₂O₃ uygulanması yaygındır [8].

Sermet

Sermet ifadesi seramik ve metal kelimelerinden türetilmiştir ve sementit karbürlerin müşterek ismidir. Sermet kesici takımda sert parçacıklar WC'den ziyade TiC, TiCN ve/veya TiN esaslı seramik parçacıklardan oluşurken birleştirici faz da nikel ve/veya molibdenden oluşur. Sermet kesici takımlar da sementit karbür gibi toz metalurjisi yöntemleriyle üretilirler. Çelik, paslanmaz çelik ve dökme demirin bitirme ve yarı bitirme işlemlerinde yüksek kesme hızlarında kullanılırlar. Çeliklerin işlenmesinde kullanılan sementit karbür kesici takımlardan genellikle daha yüksek hızlarda kullanılırlar. Düşük ilerleme hızları kullanılarak iyi bir yüzey elde edilerek çoğunlukla taşlama işlemine gerek kalmaz [124, 126].

Seramik

Seramik kesici takımlar esas olarak alüminyum oksit (Al₂O₃) ve silisyum nitrür (Si₃N₄) olmak üzere iki gruba ayrılırlar. Sementit karbür kesici takımlarla karşılaştırıldıklarında yüksek sertlik ve sıcak sertlik, yüksek aşınma ve plastik deformasyon direnci ve iyi kimyasal kararlılık özelliklerine sahip olmakla birlikte düşük ısı şok direnci ve kırılma tokluğu özellikleri sergilerler. Al₂O₃ seramik kesici takımlar dökme demir ve çelik dökümünün yüksek hızlarda işlenmesinde başarıyla kullanılırlar. Rijit olarak bağlama gerçekleştirildiğinde, sertleştirilmiş çeliklerin bitirme işlemleri yüksek hız, düşük ilerleme ve düşük talaş derinliği kullanılarak gerçekleştirilebilir [124].

Üretim ve sinterlemedeki iyileştirmelerle ve tokluklarını artırıcı çeşitli elementlerin katılmasıyla seramik kesici takımlar daha iyi dayanım, ısı şok direnci ve kırılma

tokluğu gibi özelliklere sahip olmuşlardır ve dolayısıyla uygulama alanları genişlemiştir [124].

Çok sert kesici takımlar

Doğal elmas (tek kristalli), çok kristalli elmas (ÇKE) ve kübik bor nitrür (KBN) çok sert kesici takımlar grubuna giren malzemelerdir.

Doğada bilinen en sert malzeme doğal elmadır. Sementit karbür veya Al_2O_3 'ten yaklaşık olarak 3-4 kat daha serttir. Anizotropik özellik sergilediği için ölçüm yapılan kristal düzlemine bağlı olarak sertliği 6500–12000 VSD arasında değişir. Çok yüksek sertliği, mükemmel aşınma direnci, düşük sürtünme katsayısı, düşük genleşme katsayısı ve ısı şok direncini artıran yüksek iletkenliği ve iyi uç keskinliği tek kristalli elması takım malzemesi olarak cazip hale getirmiştir. Elmas kesici takımlar yüksek sertliklerinden dolayı karbür ve seramik kesici takımlardan aşınma direnci abrasif aşınma mekanizmasının hakim olduğu yerlerde çok daha iyidir [8, 123].

Kesici takım olarak tek kristalli elmas özel uygulamalar için kullanılır. En yüksek sertliği veren kristal yönlenmesi seçilir ve kesici takım geometrisine lepleme ile getirilir. Kesici uçlar mükemmel biçim hassasiyetine getirilir, uçlar hazırlanır ve çok yüksek hassasiyette ve kalitede bitirme yüzeyleri elde edilebilir. Optik aletlerin üretimi için kullanılır. Bununla birlikte, düşük tokluklarından, kesici takım geometrisine getirilmedeki güçlüklerinden ve yüksek maliyetlerinden dolayı tek kristalli elmas kesici takımların kullanımları oldukça sınırlıdır [123].

Çok kristalli elmas (ÇKE) kesici takımlar yapay elmanın grafitik karbondan çok yüksek sıcaklık ve basınç altında üretiminden sonra kullanılmaya başlanmıştır. Çeşitli boyut ve şekillerde üretilen elmas parçacıkları bir metalik birleştirici ile birlikte bir araya getirilerek sıcak presleme yöntemiyle çok yüksek basınç altında kesici takım geometrisinde imal edilir. Çoğunlukla 0,5–1 mm kalınlığındaki ÇKE, sementit karbür alt katman üzerinde kesici takım olarak kullanılır [126].

ÇKE kesici takımlar rasgele yönlenmiş elmas parçacıklarından oluştuğu için çoğu uygulamalarda izotropik davranış sergilerler. Doğal elmastan elde edilebilecek kadar mükemmel bir kesici ucun ÇKE kesici takımla elde edilmesi mümkün olmamakla birlikte kesici uç deformasyona daha az duyarlıdır. Bununla birlikte diğer kesici takımlarla karşılaştırıldığında aşınmaya karşı dayanımı mükemmeldir. Çok uzun süre kesme hassasiyetini koruduğu için özel uygulamalar için çok uygundur. Doğal elmas gibi demir dışı ve metal dışı malzemelerin işlenmesinde kullanılır. Yüksek dayanım ve sertliğine rağmen yüksek sıcaklıkta çeliğin işlenmesinde hızlı takım aşınmasından dolayı kullanılmaz. Yüksek sıcaklıkta elmasın grafitte dönüşümü ve/veya elmas ile demir veya atmosfer arasındaki etkileşimden dolayı hızlı takım aşınması gerçekleşir [123].

Yapay elmas üretiminde kullanılan aynı teknoloji ile hekzagonal bor nitrürden KBN üretimi gerçekleştirilmiştir. 3500–4500 VSD sertliği ile elmastan sonra sertlikte ikinci sırada yer alır. 1100 °C sıcaklıkta sertliği 1800–2000 VSD olup sementit karbürün oda sıcaklığındaki sertliğine tekabül eder. Mükemmel aşınma direnci, iyi ısı iletkenliği, düşük sürtünme ve ısıl genleşme katsayıları diğer özellikleridir [123].

ÇKE kesici takımlarda olduğu gibi KBN parçacıkları çok yüksek basınçlar kullanılarak kesici takım haline getirilir. Yoğunluğunu artırmak için başlangıç parçacıklara bir miktar metal tozu ilave edilir. KBN demir, kobalt ve nikel esaslı malzemelerin işlenmesinde kullanılır. Titanyum, alüminyum ve zirkonyum gibi nitrür ve bor oluşturan elementlerle reaksiyona girer [123].

5.6. Takım Aşınması

Bütün talaşlı imalat işlemleri esnasında kesici takımlar belirli bir süre sonra etkin olarak kesme kabiliyetlerini kaybederler. Kesici takım geometrisindeki tedrici şekil değişikliği (aşınma), anlık yüksek kuvvetlerden dolayı kesici ucun kırılması ve yüksek sıcaklık ve gerilmeler nedeniyle kesici takım malzemesinin dayanımının azalarak plastik deformasyona uğraması kesici takımın kesme kabiliyetini kaybetmesinin nedenlerindendir [8, 123].

Talaş kaldırma işlemi esnasında kesici takımın aşınması aşağıdakilerden biri veya birkaçının aynı anda gözlenmesiyle anlaşılır:

- Kesme kuvvetlerindeki aşırı yükselme,
- Sıcaklık artışı,
- Aşırı titreşim,
- Yüksek gürültü,
- İşlenen malzeme boyutlarındaki değişim,
- İşlenen yüzeyin bozulması [124].

Talaş kaldırma işlemi esnasında kesici takımın kesme kabiliyetini kaybettiği üç faktör mevcuttur:

Kırılma: Kesici takıma gelen anlık yüksek kuvvetler nedeniyle oluşan kırılmalar veya sürekli olmayan kesme işlemi (frezeleme işlemi gibi) esnasında mekanik ve ısı yorulmalar sonucu kırık oluşumundan dolayı kesici takımda kırılma ve pullanma-soyulma şeklinde oluşan aşınmalardır.

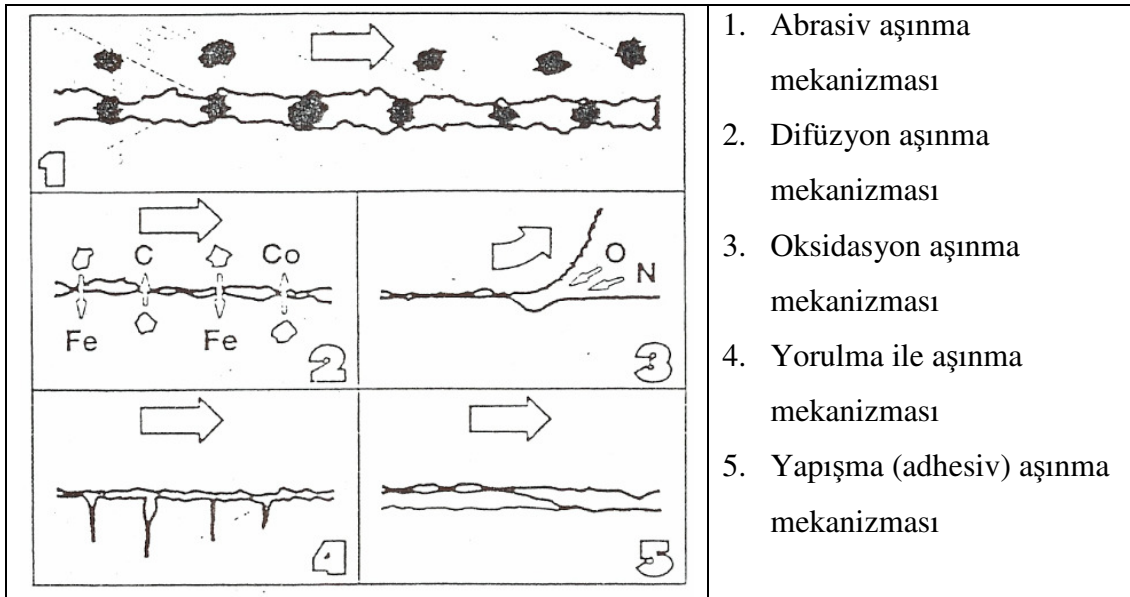
Plastik deformasyon: Kesici takımda plastik deformasyon, yüksek basınç ve sıcaklık sonucu oluşur. Plastik deformasyona uğramış kesici takım geometrisi değiştiği için kesme işlemini etkin bir şekilde yapamaz, sıcaklık artar ve talaş akışı değişir. Plastik deformasyona direnç için kesici takımın sıcak sertlik özelliğinin iyi olması gerekir. Ayrıca, uç yuvarlatma ve kesme geometrisi iyileştirilerek plastik deformasyona direnç artırılabilir.

Tedrici takım aşınması: Kesici takım üzerinde tedrici aşınma talaş yüzeyi ve yan yüzey olmak üzere iki bölgede görülür. Talaş yüzeyindeki aşınma “krater aşınması” ve yan yüzeydeki aşınma da “yan yüzey (yanak) aşınması” olarak isimlendirilir [124]. Krater aşınması, kesici takım talaş yüzeyinde talaşın hareketiyle oluşan içbükey alandır. Krater aşınmasının büyüklüğü, bu alanın derinliği ve alanı ölçülerek belirlenir. Yan yüzey aşınması ise yeni oluşan iş parçası yüzeyi ile kesici takım yan yüzeyinin sürtünmesiyle oluşur. Yan yüzey aşınması bu aşınma bandının genişliği ile

ölçülür. Kesici takımın iş parçası orijinal yüzeyi ile temasta olan yan yüzeyinde çoğunlukla daha fazla bir aşınma görülür. Çentik aşınması olarak adlandırılan bu aşınmanın sebebi iş parçası yüzeyinin soğuk haddeme veya önceki işlemlerden dolayı sertleşmiş olması, dökümden kalan sert malzemeler ve diğer nedenlerdir [8, 124].

Takım aşınması, kesici kenar üzerine gelen çeşitli yüklerin etkisi ile meydana gelen malzeme kaybı ve kesicide ortaya çıkan geometrik değişikliktir. Aşınmaya neden olan yük faktörleri kesici kenar ömrünü ve kenar geometrisini değiştirmeye çalışır. Bu faktörler; mekanik, termal (ısı), kimyasal ve aşındırıcı faktörlerdir.

Talaş kaldırma sırasında kesici kenar üzerinde etkili olan yük faktörlerinin etkisiyle bazı temel aşınma mekanizmaları talaş kaldırma işlemini etkilemektedir. Temel aşınma mekanizmalarının davranışları Şekil 5.6'da verilmiştir.



Şekil 5.6. Temel aşınma mekanizmalarının şematik olarak gösterilmesi [124]

5.6.1. Aşınma mekanizmaları

Abrasiv aşınma mekanizması: En çok görülen aşınma mekanizmalarındandır. Genelde iş parçası içinde bulunan sert parçacıklar sebep olur. Sert parçacıklar iş

parçası ile kesici kenar arasına geldiğinde taşlama benzeri bir durum olur ve kenarda aşınmalar başlar.

Difüzyon aşınma mekanizması: Takım ve talaş yüzeyi arasındaki temas yüzeyinde artan sıcaklık difüzyona sebep olur. Bu nedenle takım-talaş ara yüzeyinde her iki yöne gerçekleşen atomsal düzeydeki yayılım nedeni ile takım malzemesi mikro yapısal değişime uğrar. Çoğunlukla sıcaklığa bağlıdır. Bu nedenle yüksek kesme hızında daha fazla görülür. Yayılım; çelikten takım içine demir transferi ve karbonun talaşa difüzyonu şeklinde olmaktadır.

Oksidasyon aşınma mekanizması: Genelde metal malzemeler için yüksek sıcaklık ve havanın varlığı oksidasyonu artırır. Oksidasyon, tungsten ve kobaltta talaş tarafından daha kolay kazanıp uzaklaştırılabilen gözenekli oksit filmi şeklinde oluşur. Kesici kenarla parçanın ara yüzeyinde, talaş genişliğinin bittiği yerde hava talaş sürecine katılma imkanı bulur ve bu bölgede tipik çentiklerin oluşmasına neden olur [125, 129].

Yorulma ile aşınma mekanizması: Isıl-mekanik bir olaydır. Kesme bölgesinde sıcaklıktaki düzensiz değişimler ve kesme kuvvetlerindeki dinamik değişimler kesici kenarda çatlama ve kırılmalara neden olur. Yetersiz tokluk nedeni ile talaş kaldırma sırasında kesiciden küçük parçaların kopmasıyla oluşan bir aşınma mekanizmasıdır. Aralıklı kesme işlemi kesici ucun sürekli olarak ısınıp soğumasına ve kesme bölgesinde kesici kenarda şok etkilerine neden olur. Yapışık talaşın altında kaldığından tespiti zordur.

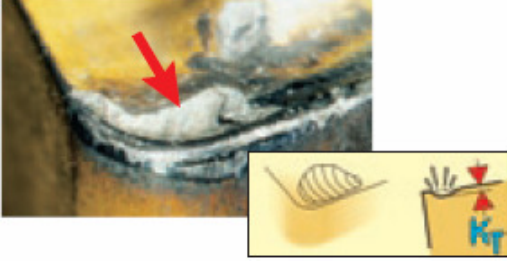
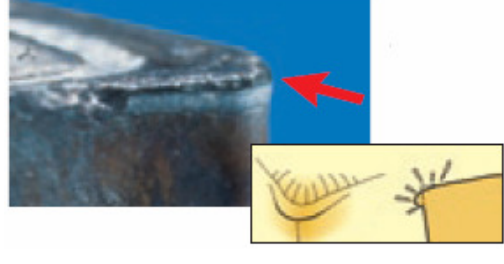
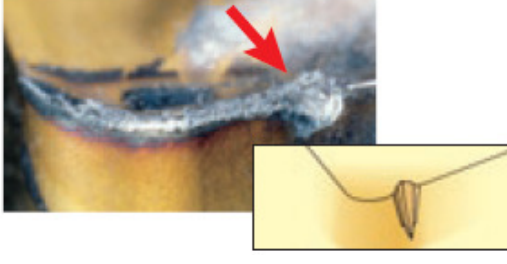
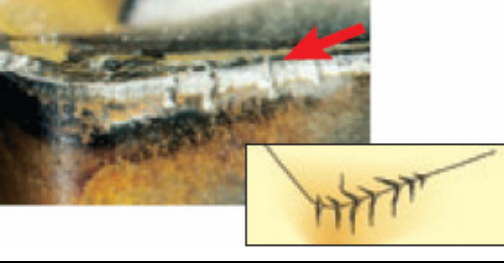
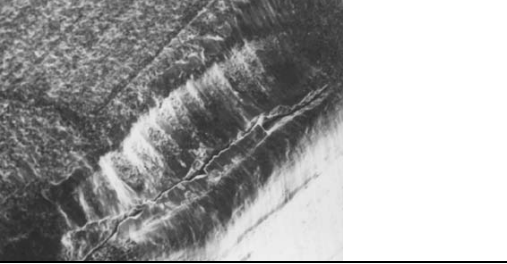
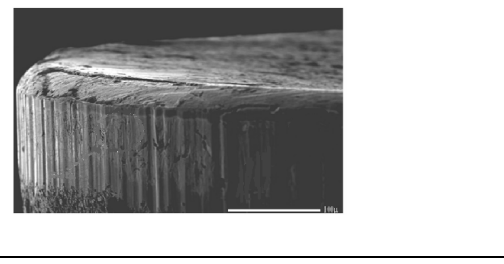
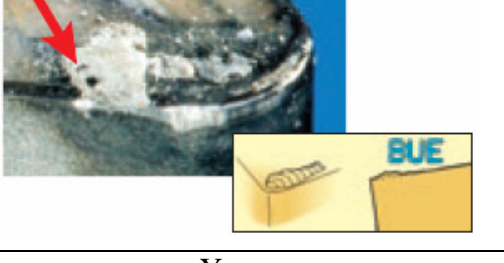
Yapışma (adhesiv) aşınma mekanizması: Takım-talaş ara yüzeyinde düşük sıcaklıklarda oluşur. Akma veya kısa talaş veren malzemelerin tamamında görülebilir. Bu mekanizma genellikle kesici kenar ile talaş arasında, kenar üzerinde yığılmış talaş (BUE) oluşmasına neden olur. Dinamik bir yapısı vardır. Birbirini takip eden talaş katmanları talaş yüzeyine kaynaklanarak sertleşir ve kesici kenarın bir parçası haline alır. Oluşan BUE tabakası yırtılıp kopar ve yenisi oluşur. Bu kopmalar sırasında kesici kenardan parçalarda kopmaya başlar. Yüksek sıcaklıklarda

yapışma olayı önemli ölçüde ortadan kalkar. Yapışan tabaka takım geometrisini değiştirdiğinden kesme kuvvetlerini de değiştirir [123, 125].

5.6.2. Aşınma tipleri

Belirtilen aşınma mekanizmaları nedeniyle meydana gelen aşınma tiplerinin sınıflandırılması, işleme tipi, malzeme için doğru işleme şartları ile takım sınıfının belirlenmesinde ve dolayısıyla kesme işleminin optimizasyonu için önemlidir [120, 125]. Resim 5.1’de kesici takımlarda görülebilen aşınma tipleri verilmiştir.

1. Yanak aşınması : Abrasiv aşınma mekanizmasıyla oluşur.
2. Krater aşınması : Abrasiv ve difüzyon aşınma mekanizmasıyla oluşur.
3. Plastik deformasyon : Yorulma aşınma mekanizmasıyla oluşur.
4. Çentik aşınması : Oksidasyon ve yapışma aşınma mekanizmasıyla oluşur.
5. Termal çatlaklar : Isıl yorulma aşınma mekanizmasıyla oluşur.
6. Mekanik yorulma çatlakları : Mekanik yorulma aşınma mekanizmasıyla oluşur.
7. Çıtlama (Çentiklenme) : Yorulma aşınma mekanizmasıyla oluşur.
8. Kırılma (Kesici uç kırılması) : Plastik deformasyondan sonra oluşur.
9. Yığılma-sıvanma (BUE) : Adhesiv aşınma mekanizmasıyla oluşur.

	
Yanak Aşınması	Krater Aşınması
	
Plastik Deformasyon	Çentik Aşınması
	
Termal Çatlaklar	Mekanik yorulma çatlakları
	
Çıtlama	Kırılma
	
Yapışma	Talaş vurması

Resim 5.1. Kesici takımlardaki aşınma tipleri [130]

5.7. İşlenebilirlik

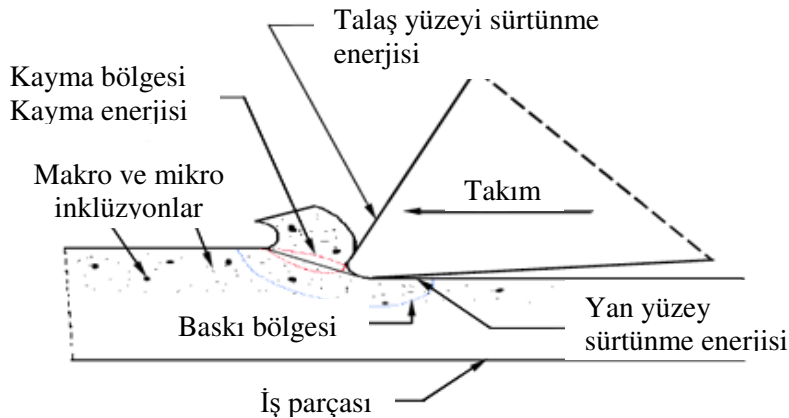
İşleme araştırmalarının genel amacı, en iyi ürün kalitesi ve en düşük işleme maliyetinin oluşmasını sağlayan optimum kesme şartları için iş parçası-kesici takım etkileşimini araştırmaktır. İşlenebilirlik bir malzemenin takımlama ve işleme süreçleri açısından tasarlanan şekilde (yüzey kalitesi ve tolerans) kolaylıkla kesilebilmesini tanımlamak için kullanılan terimdir. Bir işleme operasyonunda işlenebilirliği ölçmek için talaşların biçiminin yanı sıra ulaşılan takım ömrü, talaş kaldırma oranı, kuvvet bileşenleri, güç tüketimi ve işlenmiş parçaların yüzey kalitesi ve yüzey bütünlüğü kullanılabilir. İşlenebilirlik, seçilen kesme şartları, kesici takım geometrisi ve özellikleri, işlenen malzemenin özellikleri ile kesme ortamı, takım tezgahının rijitliği gibi muhtelif faktörlerden önemli derecede etkilenebilmektedir. İşleme verimliliği, işlenen parçaların toleranslar dahilinde ve bütünlüğünü bozmadan yüksek hızda işlenmesini sağlayacak kesici takım, kesme şartları ve takım tezgahı kombinasyonunun doğru seçilmesiyle önemli oranda iyileştirilebilir [118].

İşlenebilirlik, talaşlı imalatla şekillendirilmek üzere seçilen malzemenin özelliklerinin, seçilen talaşlı imalat yöntemindeki parametrelere bağlı olarak, malzemenin ve talaşlı imalat yönteminin değişkenlerinin ayrı ayrı ve bütün olarak sergiledikleri davranışlardır. İşlenebilirlik, ekseriyetle malzemenin özgül bir özelliği olarak algılansa da, sadece işlenen malzemeye bağlı olmayıp aynı zamanda işleme yöntemi ve işleme parametrelerini de kapsamaktadır [126]. Bir iş parçasının işlenebilirliğini etkileyen ana faktörler, işleme süresince plastik deformasyonun değerlendirilmesi açısından önemli olup aşağıdaki şekilde özetlenebilir:

- ★ *İşleme şartları*; kesme hızı, ilerleme miktarı, kesme derinliği,
- ★ *Takım yönünden*; kesici takım malzemelerinin özellikleri ve mikroyapıları, takım geometrisi, takım kırılma direnci,
- ★ *İş parçası yönünden*; mekanik, fiziksel ve ısı özellikler, yüksek gerilme ve yüksek gerilim oranlarında mikroyapısal değişimler, kesme parametreleri kadar iş parçasının mikroyapısı ve özelliklerinden etkilenen kayma düzlemi açısı ve talaş kalınlığı, mekanik enerjinin dağılması süresince oluşan sıcaklık artışıdır. Sıcaklığın artmasına neden olan ısı miktarı takım malzemeleri, iş

parçasının mekanik ve fiziksel özelliklerinin yanı sıra işleme parametrelerine bağlıdır. Sıcaklık yalnızca takım kırılmasıyla değil iş parçasının plastik deformasyon davranışı ve talaş oluşumuna bağlı olarak da artmaktadır [131].

Malzemelerin işlenebilirliklerini etkileyen malzeme özellikleri sertlik, süneklik, ısı iletkenlik, pekleşme, malzeme içindeki kalıntılar (*inklüzyonlar*) ve malzemenin kimyasal bileşimidir (Şekil 5.7). Örnek olarak, sertlik arttıkça kesici takımda abrasif aşınma artar ve dolayısıyla takım ömrü kısalmır. Düşük sertlik ve dayanım genelde iyi işlenebilirlik anlamına gelmekle birlikte sertliği az olan çok sünek malzemelerde yığıntı talaş (YT) oluşumu gerçekleştiği için yüzey kalitesi kötüleşir ve takım ömrü kısalmır. Çok düşük sertlik talaşlı imalat işleminin performansını kötü yönde etkileyebilir [132]. Örnek olarak, nispeten düşük sertliğe sahip düşük karbonlu çeliğin işlenmesinde kötü yüzey kalitesi oluşur ve talaş uzaklaştırılmasıyla ilgili problemlerle karşılaşılır. Bu nedenle, düşük karbonlu çeliklerde yüzey sertliğini artırmak ve talaş kırılmasını sağlamak için genellikle soğuk çekme işleme uygulanır. Düşük süneklik, metal kesme işleminde genelde olumlu bir etki yaparak iyi talaş oluşumuna katkıda bulunur ve metal kesme işlemi için daha az güç gerektirir. Artan iş parçası dayanımı da kesme kuvvetleri, özgül enerji ve kesme sıcaklığını artıracığı için, artan dayanımla metal kesme işlemi zorlaşır. Bununla birlikte, yüksek ısı iletkenlik kesme bölgesinde oluşan ısının hızlı olarak uzaklaştırılması demektir. Bu nedenle, yüksek ısı iletkenlik işlenebilirlik yönünden genelde faydalıdır [123, 125].



Şekil 5.7. İşlenebilirliği etkileyen faktörler [132]

Alaşım elementleri dayanımı artırır, aynı zamanda her kesme hızı için akma bölgesi sıcaklığını da artırır. Buna bağlı olarak yüksek erime noktasına sahip alaşımlar kesilirken maksimum talaş kaldırma oranı azalmaktadır. Alaşımına eklenen kükürt ve kurşun akış bölgesinde harcanan enerjinin azalması vasıtasıyla ara yüzey sıcaklığını düşürebilir, ancak bu elementlerin davranışları karmaşıktır ve henüz tam olarak anlaşılamamıştır. Kritik metal hacmine ulaşamamasının ve küçük boyut nedeniyle araştırılması çok zor bir bölgedir. Öte yandan akış bölgesindeki malzeme davranışının çok iyi anlaşılması, işlenebilirliğin anlaşılabilmesi için önceden bilinmesi açısından önemlidir. Bu araştırmalar şiddetli gerilme ve gerinim oranına maruz kalan malzemelerin davranışı için teorik bir ilişkiye sahiptir. Takım-talaş ara yüzeyinde ikinci deformasyon bölgesinde oluşan çok farklı değişimler ve malzemedeki birinci kayma düzlemi boyunca meydana gelen geçişler işlenebilirlik kavramının ayrıntılı olarak anlaşılmasını sağlar. Daha önce bahsedilenlere ilave olarak, standart mekanik testleri yoluyla ölçülen özellikler ile doğrudan ilişkilidir. Bununla birlikte, ikinci kayma bölgesindeki davranış ancak işleme sürecinin gözlemlenmesiyle araştırılabilir. Yüksek erime noktasına sahip olan metaller ve alaşımları için ikinci deformasyon bölgesindeki (*akma bölgesi*) ısı ve ısı dağılımı işlenebilirliğin her yönünden önemli bir rol oynar. Ara yüzeyde meydana gelen yapışma, difüzyon ve etkileşim anlaşıldığında takım aşınma oranları güvenilir bir şekilde tahmin edilip kontrol edilebilir. Bu özellikle yeni ve pahalı takım malzemelerinin kullanımında önemlidir. Ayrıca, kolay işlenebilir işparçası malzemelerinin elverişli bir biçimde gelişimi için gereklidir [123].

6. MATERYAL ve METOT

6.1. Matris Malzemesi

Metal matrisli kompozit numunelerin üretiminde, *ECKA* firmasının Alumix 231 kodlu alüminyum toz malzemesi matris malzemesi olarak seçilmiştir. Alumix 231 tozu, gaz atomizasyon tekniği ile üretilmiş *AlSiCuMg* alaşımıdır. Bileşiminde bulunan %14-16 Si miktarı, Alumix 231 tozunun hiperötektik Al-Si alaşımları içinde değerlendirilmesinde birincil parametredir. Aynı zamanda Alumix 231, ön alaşımlama yapılarak üretilmiş bir toz malzeme olup, doğrudan presleme ve takiben sinterleme işlemi uygulanabilir özelliğe sahiptir. Matris malzemesinin kimyasal ve fiziksel özellikleri Çizelge 6.1’de verilmiştir.

Çizelge 6.1. Matris malzemesinin (Alumix 231) özellikleri [133]

<i>Fiziksel özellikler</i>		<i>Kimyasal bileşim (%)</i>	
Görünür yoğunluk (g/cm ³)	1,05 – 1,20	Silisyum (Si)	14 - 16
Dolu yoğunluk (g/cm ³)	1,20 – 1,50	Bakır (Cu)	2,4 – 2,8
Elek boyutu<63µm (%)	25 - 40	Magnezyum (Mg)	0,50 – 0,80
Ham yoğunluk (g/cm ³)	2,56	Yağlayıcı	1,5 (Amidwax)
Sinterlenmiş yoğunluk (g/cm ³)	2,67	Alüminyum (Al)	Kalan
Sertlik (BHN)	100		
Uzama (%)	1		

6.2. MMK Üretiminde Kullanılan Takviye Elemanı

Kompozit malzemenin üretiminde, takviye elemanı olarak %99,9 saflıktaki SiC seramik parçacıklar kullanılmıştır. Takviye malzemesinin mekanik ve fiziksel özellikleri Çizelge 6.2’de verilmiştir. SiC düşük yoğunluk, yüksek sertlik, düşük termal uzama, yüksek ısıl iletkenlik, yüksek elastikiyet modülü, mükemmel ısıl şok direnci ve yüksek kimyasal kararlılığa sahip bir seramik malzemedir.

Çizelge 6.2. SiC'ün bazı mekanik ve fiziksel özellikleri

<i>Yoğunluk (g/cm³)</i>	<i>Isıl iletkenliği (W/m.°K)</i>	<i>Elastikiyet modülü (GPa)</i>	<i>Poisson's oranı</i>
3,2	120	410	0,14
<i>Sertlik (HBN)</i>	<i>Basma dayanımı (MPa)</i>	<i>Kırılma tokluğu (MPa.m^{1/2})</i>	<i>Isıl genleşme katsayısı (10⁻⁶/°C)</i>
2800	3900	4,6	4
<i>Özgül ısı (J/kg.°K)</i>	<i>Elektrik direnci (kVmm⁻¹)</i>	<i>Hacimsel geçirgenlik (Ohm.cm)</i>	<i>Kullanım sıcaklığı (°C)</i>
750	28	10 ⁴	1650

Silisyum karbür, Çizelge 6.2'de verilen bu özellikler ve mekanik özelliklerinin geliştirilebilmesine bağlı olarak türbin birleştirme ve hareket elemanları, emme manifoldu kaplaması, sızdırmazlık elemanları ve yataklar, valf parçaları, kesici takımlar, aşındırıcılar, sıcak gaz akış boruları, ısı değiştiriciler ve yarı iletken ekipmanların yapımında yaygın olarak kullanılmaktadır [134].

6.2.1. Takviye elemanı biçim incelemesi

Kompozit malzemelerin dayanım özelliklerini belirleyen önemli etkenlerden birisi takviye fazının biçimidir. Bu nedenle takviye elemanının şekil yapısının anlaşılabilmesi için tarama elektron mikroskopunda (SEM) fotoğrafları çekilerek, parçacıkların biçimi hakkında inceleme yapılmıştır. Bu incelemeler Gazi Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Metal Eğitimi Bölümü, Metalürji Anabilim Dalı'nda yer alan *INSTRUMENT JSM-6060* marka kodlu SEM cihazında gerçekleştirilmiştir.

6.2.2. Parçacık boyut analizleri

Kompozit malzemelerin üretiminde kullanılan takviye elemanının parçacık boyut analizinde Gazi Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Yapı Eğitimi Bölümü, Zemin Mekaniği Laboratuvarı'ndaki *MasterSizer X Ver.1.2b* kodlu Laser parçacık boyut

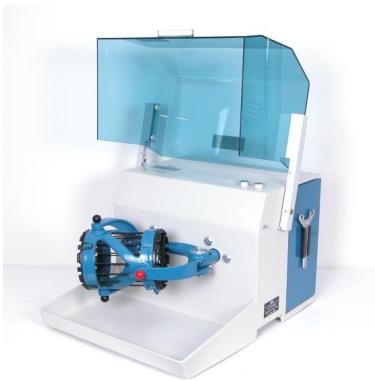
analiz cihazı kullanılmıştır. Deneyler ISO 13320–1 kodlu standarda uygun olarak gerçekleştirilmiştir [135].

6.3. Kompozit Numunelerin Üretimi

Alumix 231 kodlu Al-Si alaşımı matrisli SiC takviyeli kompozit malzeme numunelerin üretilmesinde toz metalurjisi (TM) yöntemi kullanılmıştır. Üretim yöntemine göre PMMK numunelerin elde edilme süreci aşağıda verilmiştir.

6.3.1. Numunelerin hazırlanması

Numunelerin hazırlanmasında ilk aşama matris ve takviye fazlarını oluşturan tozların ağırlık oranlarına göre tartılması ve takiben karıştırılması işlemidir. Tozların tartı işlemleri Çizelge 6.3'teki karışım oranlarına göre *Sartorius* marka 0,1 mg hassasiyetteki terazide yapılmıştır. Karıştırma işlemi, Gazi Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Metal Eğitimi Bölümü laboratuvarlarındaki *Turbula-Model T2F* marka karıştırıcı cihaz ile gerçekleştirilmiştir (Resim 6.1). Karıştırıcı; 2 litre hacimde karıştırma tankına sahip olup her türlü metal tozunu dönme, öteleme ve ters dönme hareketlerini aynı anda yaparak, tozların homojen bir şekilde karışmasını sağlamaktadır [136]. Matris malzemesi ile seramik takviyenin homojen karışımını sağlamak amacıyla Turbula'da karıştırma işlemi 30 dakika süreyle, 60 rev/min'de yapılmıştır. Her karıştırma işleminde karıştırıcı tankı içerisine 100 gr karışım toz yüklenmiştir.



Resim 6.1. Karışım cihazı [136]

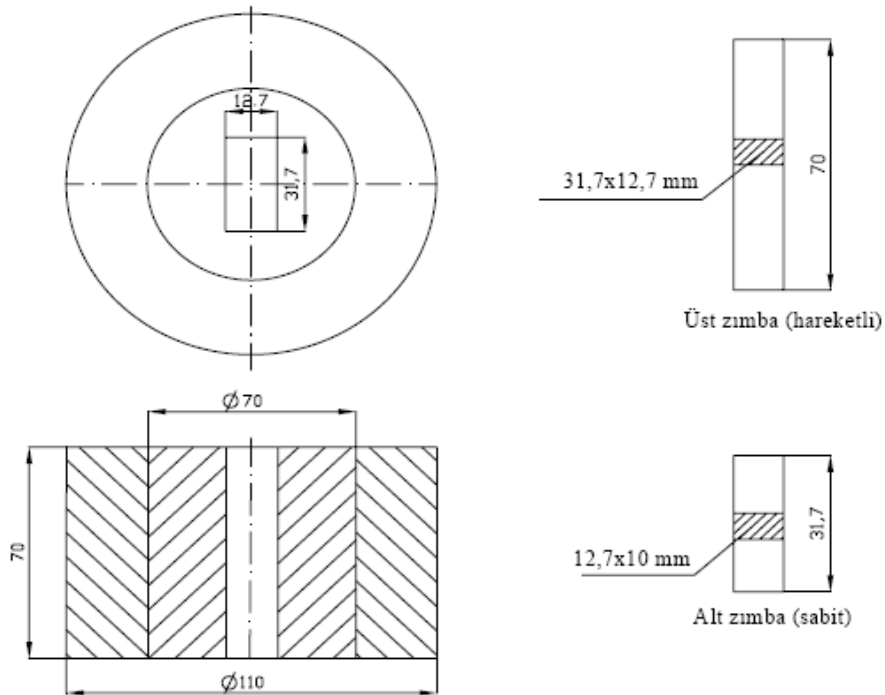
Çizelge 6.3. Numune karışım oranları

Numune kodu	% Al (ağırlıkça)	% SiC (ağırlıkça)	Al (g)	SiC (g)
%5 SiC	95	5	47,5	2,5
%10 SiC	90	10	45	5
%15 SiC	85	15	42,5	7,5

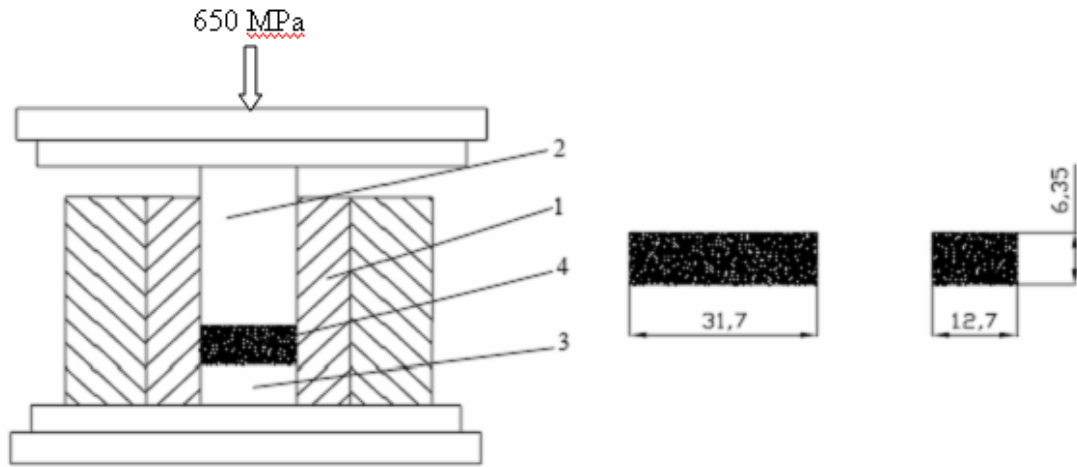
6.3.2. Tozların preslenmesi

Numune üretiminde ikinci aşama karışım tozlarının preslenmesi işlemidir. Karışım oranına göre Turbula’da karıştırılan Al-Si alaşımı tozların ve SiC parçacıkların preslenmesi, Gazi Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Yapı Eğitimi Bölümü laboratuvarlarındaki hız kontrol ünitesine sahip 300 ton basma kapasiteli hidrolik preste, 650 MPa presleme basıncında yapılmıştır. İki farklı geometride parçacık takviyeli metal matrisli kompozit numune üretilmiştir.

Birincisi, ASTM B 312’ye göre preslenen çapraz kırılma numuneleridir (Şekil 6.1) [137]. Numuneler, 31,7x12,7x6,35 mm boyutlarına göre 1.sınıf zorluk seviyesinde olup tek yönlü presleme kalıbında preslenmiştir (Şekil 6.2).



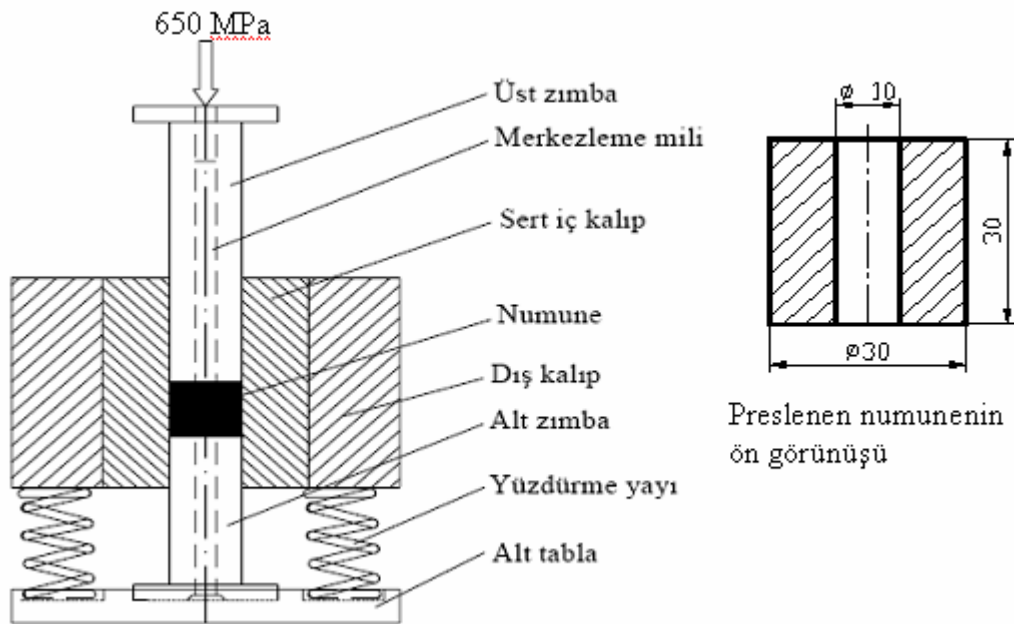
Şekil 6.1. Çapraz kırılma numunelerinin preslenmesinde kullanılan kalıp ve zımbalar



Şekil 6.2. Çapraz kırılma numunesinin preslenmesini gösteren şematik resim

1) Sert iç kalıp, 2) Üst zımba, 3) Alt zımba, 4) Numune

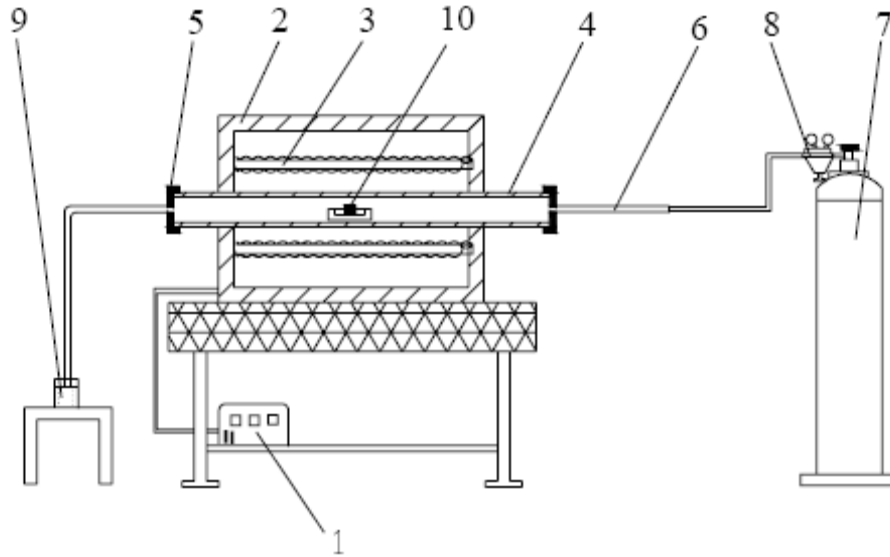
İkincisi ise işlenebilirlik deneylerinde kullanılan numuneler olup 2. sınıf zorluk seviyesinde parçalardır. Bunlar, çift taraflı sıkıştırma ile daha homojen parça üretilebilmesini sağlayan yüzer kalıp kullanılarak preslenmiştir. Numuneleri preslemede kullanılan kalıbın şekli ve preslenmiş numunenin ön görünüşü Şekil 6.3'te verilmiştir.



Şekil 6.3. Numune presleme kalıbı ve preslenmiş numunenin şekli

6.3.3. Numunelerin sinterlenmesi

Toz metal parçaların üretiminde son aşama sinterleme işlemidir. Numunelerin sinterleme işlemleri, Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi, Metal Eğitimi Bölümü, Ekstraktif Metalurji laboratuvarın da bulunan SFL marka 1200 °C kapasiteli tüp fırında, argon (Ar) gazı ortamında yapılmıştır. Şekil 6.4’de, tüp fırınında yapılan sinterleme işleminin şematik olarak resmi verilmiştir. Sinterleme işlemi, 410 °C’de 1 saat yağlayıcı uçurma işleminden sonra 585 °C’ de 1 saat süreyle yapılmıştır.



Şekil 6.4. Sinterleme işleminin şematik gösterimi

- 1) Kontrol paneli, 2) Fırın, 3) Resistans, 4) Alümina tüp, 5) Grafit kapak,
- 6) Plastik hortum, 7) Argon tüpü, 8) Manometre, 9) Gaz çıkış kabı
- 10) Numune

6.3.4. Yoğunluk hesaplamaları

Karışım tozun gerçek parça yoğunluk ölçümleri *Sartorius* marka 0,1 mg hassasiyetteki terazide yoğunluk kitiyle yapılmıştır. Karışım tozun teorik yoğunluk hesapları ise Eş.6.1 kullanılarak yapılmıştır. Karışımın teorik yoğunluğu, karışımı oluşturan her bir tozun yoğunluğu ile ağırlıkça yüzdeleri çarpılarak bulunan değerlerin toplamına eşittir.

$$\rho_{\text{karışım}} = [(\%W)1 \times \rho_1] + [(\%W)2 \times \rho_2] + \dots + [(\%W)n \times \rho_n] \quad (6.1)$$

Burada; $\rho_{\text{karışım}}$: Toz karışımın teorik yoğunluğu,
 (%W)_n : Her bir bileşenin karışım içerisindeki ağırlıkça yüzdesi,
 ρ_n : Her bir bileşenin yoğunluğudur.

Yoğunluk kitiyle yoğunluk ölçme aşağıdaki gibi yapılmıştır:

- Numunenin havadaki ağırlığı üst kefedeki ölçülür (W),
- Numune kaldırılmadan darası alınır,
- Numune su içindeki alt kefeye konarak tartılır (G),
- Havadaki ağırlık değeri sudaki ağırlık değerine bölünür ve suyun sıcaklığına göre katalogdan alınan katsayı (Rho) ile çarpılarak numunenin yoğunluğu bulunur (Eş. 6.2).

$$\rho_{\text{gerçek}} = W \div G \times \text{Rho (g/cm}^3\text{)} \quad (6.2)$$

Toz karışımın teorik yoğunluğu (%) ise aşağıdaki oranlama ile hesaplanmıştır. Gerçek parça yoğunluğunun teorik yoğunluğa bölünmesiyle her bir karışım oranı için teorik yoğunluk (%) hesaplanmıştır (Eş. 6.3).

$$\rho_{\text{karışım}} (\%) = (\text{Gerçek yoğunluk} \div \text{Teorik yoğunluk}) \times 100 \quad (6.3)$$

Ham yoğunluk ise sinterleme öncesi numunelerin yukarıdaki gibi ölçülmesiyle elde edilmiştir.

6.3.5. Sertlik Ölçümü

Sertlik ölçümleri Vickers sertlik ölçüm yöntemi kullanılarak *INSTRON WOLPERT* marka GmbH Diastestor 7551 tipi sertlik ölçüm cihazında 5 Kg'lık (HV5) yük altında gerçekleştirilmiştir. Sertlik, sinterlenmiş numuneler üzerinden en az 5 ölçüm sonucunda elde edilen değerlerin ortalaması alınarak tespit edilmiştir.

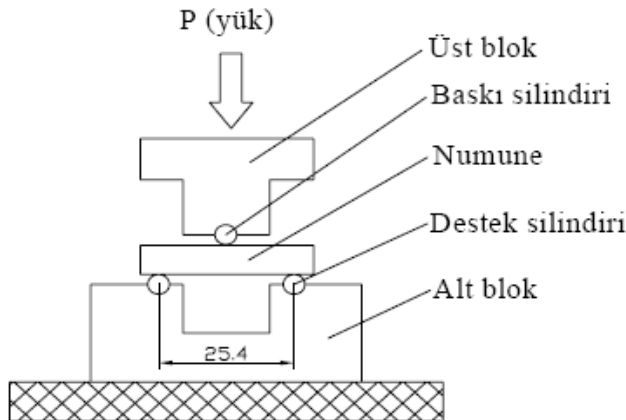
6.3.6. Çapraz kırılma mukavemeti ölçümü

Toz metalurjisi yöntemiyle üretilen numunelerin mekanik özellikleri üzerine yapılan çalışmalarının son aşaması *çapraz kırılma mukavemeti* (ÇKM) deneyidir. Sinterleme sonrası malzemelerin çapraz kırılma mukavemetlerini belirlemek için numuneler, ASTM B 312'ye uygun ölçülerde numune elde etmek amacıyla, numuneler sırasıyla 400#, 600#, 800# ve 1200# numaraya kadar yüzeylerinde herhangi bir çentik, çizik vb. kusurların kalmamasına dikkat edilerek zımparalanmış ve keçe ile 1 µm elmas pasta kullanılarak yüzeyleri parlatılmıştır. Parlatılan numuneler Şekil 6.5'de şematik olarak verilen standart çapraz kırılma deney aparatında kırılma deneyine tabi tutulmuştur. Kırma işlemi 0,05 kN/sn yükleme hızıyla ELE marka hidrolik preste gerçekleştirilmiştir. Presten elde edilen yük değerine (P) göre numunelerin çapraz kırılma mukavemetleri Eş.6.4'de verilen standart formül ile hesaplanmıştır [137]:

$$\text{ÇKM} = \frac{3 \cdot P \cdot L}{2 \cdot t^2 \cdot w} \quad (6.4)$$

Burada;

- P: Deney parçasının kırıldığı andaki yük (N)
- L: Destekler arası uzaklık (25,4 ± 3 mm)
- t: Deney parçasının yüksekliği (6,35 mm)
- w: Deney parçasının genişliği (12,70 mm)
- ÇKM: Çapraz kırılma mukavemeti (MPa)



Şekil 6.5. Çapraz kırılma deney aparatının şematik gösterimi

6.4. Numunelerin İşlenebilirlik Özelliklerinin Belirlenmesi

Üretilen parçacık takviyeli metal matrisli kompozitlerin ticari anlamda, ekonomik kullanımlarının belirlenmesi amacıyla işlenebilirlik özelliklerinin tespit edilmesi gerekmektedir. Kompozit numunelerin işlenebilirlikleri; kesme kuvvetleri, yüzey pürüzlülüğü, talaş biçimleri ve talaş kökü morfolojisi açısından incelenmiştir.

6.4.1. Takım tezgahı, takım tutucular ve kesici takımlar

Takım tezgahı

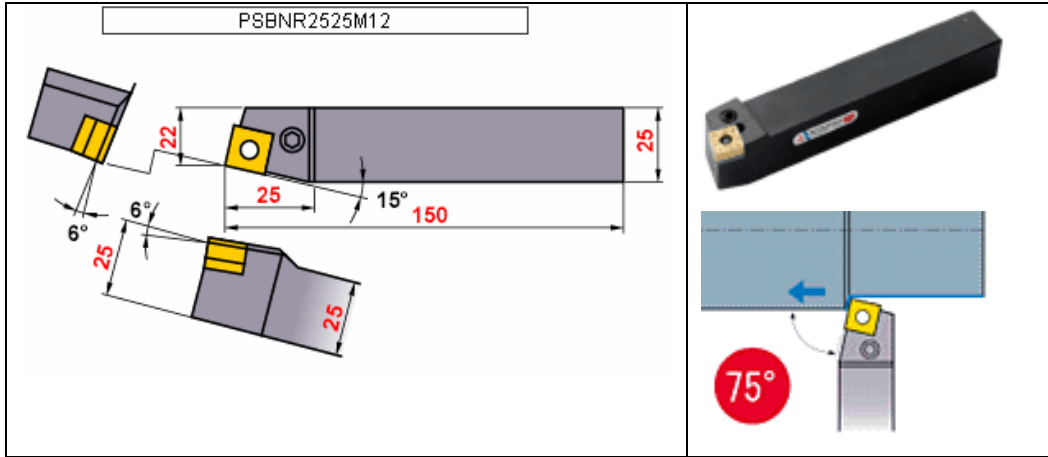
İşlenebilirlik deneyleri Gazi Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Makina Eğitimi Bölümü, Talaşlı Üretim Anabilim Dalı'nda yer alan Johnford TC35 marka, Bilgisayar Sayısal Denetimli (BSD) torna tezgahında yapılmıştır. Tezgahın teknik özellikleri Çizelge 6.4'te verilmiştir.

Çizelge 6.4. BSD torna tezgahının teknik özellikleri

<i>Markası</i>	Johnford TC35
<i>İş mili en fazla döndürme çapı</i>	450 mm
<i>En fazla parça bağlama boyu</i>	1200 mm
<i>Sürekli dönme devir sayıları</i>	10-3500 rev/min
<i>Kesici bağlama hane sayısı</i>	12 Adet
<i>İş mili gücü</i>	10 kW
<i>İşletim sistemi</i>	Fanuc OT

Takım tutucu

İşlenebilirlik deneylerinde kullanılan takım tutucu ISO 3685'te [138] belirtilen özelliklere ve deneylerin yapılacağı BSD tezgahının kesici takım bağlama başlığı yuvasına ve dinamometre kesici takım bağlama yerine uygun olarak seçilmiştir. Bu kapsamda işleme deneylerinde kullanılmak üzere “PSBNR 2525 M12” kodlu takım tutucu Mitsubishi Carbide firmasından tedarik edilmiştir. Kesici takım tutucunun özellikleri Şekil 6.6'da gösterilmiştir.

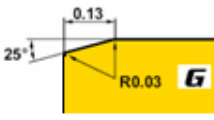


Şekil 6.6. İşlenebilirlik deneylerinde kullanılan takım tutucu özellikleri [139]

Kesici takımlar

İşlenebilirlik deneylerinde, üç ayrı kaliteye sahip kaplamasız kesici uçlar kullanılmıştır. Bu kesici uçlar Mitsubishi Carbide firmasının ürettiği sementit karbür (SK), kübik bor nitrür (KBN) ve çok kristalli elmas (ÇKE) kesicilerdir. Kesici takımların ISO kodları, yapı ve geometrik özellikleri ile teknik bilgileri Çizelge 6.5'te verilmiştir.

Çizelge 6.5. Kesici takımların kodları ve özellikleri [140]

Kesici takım	Üretici kodu	Ana karbür yapısı	ISO geometri tanımlama kodu	Kesici takım geometrisi	Kesici takım fotoğrafı
SK	UTi20T	WC-TiC-TaC-Co	SNMA120408 (K20)	0° 	
KBN	MB802 5	KBN Bağlayıcılar: TiN, Al ₂ O ₃	SNGA120408 G2	 Honlanmış	
ÇKE	MD220	KBN Bağlayıcılar: Özel seramikler	SNGA120408 G2	 Honlanmış	

Kesme parametreleri

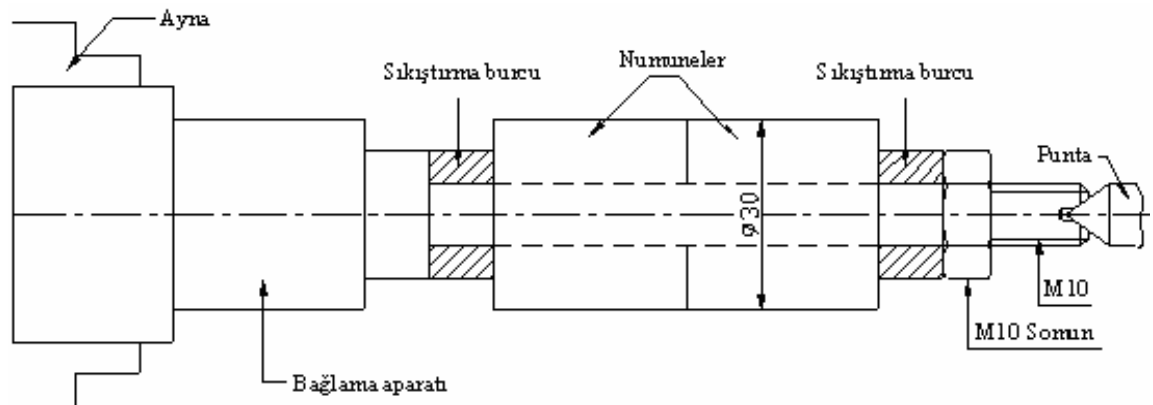
İşlenebilirlik deneyleri kuru işleme şartlarında, sabit kesme derinliği, iki farklı ilerleme hızı ile dört farklı kesme hızı seçilerek yapılmıştır. Kesme derinliği ve ilerleme hızları ISO 3685’te belirtildiği üzere kesici takım uç yarıçapına bağlı olarak, verilmesi gereken değer aralığında olacak şekilde seçilmiştir. Kesme hızları ise üretici firma önerileri ve örnek literatür çalışmalarına bağlı olarak tespit edilmiştir. Seçilen kesme parametreleri ve seviyeleri Çizelge 6.6’da verilmiştir.

Çizelge 6.6. Deneylerde kullanılan kesme parametreleri ve seviyeleri

<i>Kesme derinliği (a), mm</i>	<i>İlerleme hızı (f), mm/rev</i>	<i>Kesme hızı (V), m/min</i>
1	0,1 ve 0,2	75, 150, 225, 300

6.4.2. Numunelerin bağlanması

Üretimi gerçekleştirilen burç şeklindeki PMMK numunelerin işlenmesinde, tezgaha bağlamada kolaylık ve ekonomik olarak işlememize imkan sağlayacak şekilde bir bağlama aparatı tasarlanmış ve imalatı yapılmıştır (Şekil 6.7).



Şekil 6.7. Bağlama aparatına, üretilen malzemelerin yerleştirilmesi

6.4.3. Kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazları

Kesme kuvveti ölçümü

Kesme kuvvetlerinin ölçümünde *Johnford TC35* tipi BSD torna tezgahına bağlanmış kesme kuvvetlerinin üç bileşenini aynı anda ölçebilen *Kistler 9257B* model dinamometre kullanılmıştır. Kesme kuvvetleri, her bir deneyde talaş kaldırma süresince ölçülmüştür. Sonuçların grafik olarak elde edilmesi için, yine bir Kistler ürünü olan *Dynoware* isimli bilgisayar yazılımı kullanılmıştır. Bu program yardımıyla kesme kuvvetlerinin üç bileşeni için kesme süresince elde edilen kuvvet değerlerinin ortalamaları alınmıştır.

Yüzey pürüzlülüğü ölçümü

Yüzey pürüzlülüğü ölçümleri portatif bir yüzey pürüzlülük cihazı olan *Mahr Perthometer M1* cihazı yardımıyla yapılmıştır. Bu cihazın teknik özellikleri Çizelge 6.7’de verilmiştir.

Çizelge 6.7. Yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazının teknik özellikleri

<i>Model</i>	M1
<i>Tarama hızı</i>	0,5 m/sn
<i>Tarama kuvveti</i>	0,75 mN
<i>İğne uç yarı çapı</i>	2 μ m
<i>Ölçüm aralıkları</i>	100-150 μ m
<i>Profil çözünürlüğü</i>	12 mm
<i>Filtre</i>	Gaussian
<i>Örnekleme uzunluğu (λ)</i>	0,25 – 0,8 – 2,5 (mm)
<i>Ölçme uzunluğu (L)</i>	1,75 – 5,6 – 17,5 (mm)
<i>Ölçülebilen parametreler</i>	Ra, Rz, Rmax
<i>Dil</i>	Seçilebilir 10 Avrupa, 3 Asya dili
<i>Güç kaynağı</i>	Entegre, NiCd şarj edilebilir pil
<i>Boyutlar</i>	190 x 170 x75 mm
<i>Yaklaşık ağırlık</i>	90 gr

Ölçüm işlemleri ISO 4288’e uygun olarak, örnekleme uzunluğu (λ) ve ölçme uzunluğunun (L) tespitinde ilgili kurallara uyulmuştur [140]. Örnekleme

uzunluğunun tespitinde ilerleme değerleri belirleyici olmuştur. Pürüzlülük ölçümünde örnekleme uzunluğu 0,25 mm ve ölçüm uzunluğu 1,75 mm seçilmiştir. İşlenen her bir bölgeden 3'er yüzey pürüzlülüğü ölçümü alınmış ve bunların aritmetik ortalaması alınarak ortalama yüzey pürüzlülük (R_a) değerleri belirlenmiştir.

Talaş kökü incelemeleri

Talaş kökü alma çalışmaları, *Microweily* marka TY-3060 X 1000 tip kopya torna tezgahı yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Tezgah 3 kW gücünde olup 63-2500 rev/min dönme sayısı aralığında çalışabilmektedir.

Talaş kökü alma işlemleri için tezgah üzerinde bulunan ani durdurma mekanizması kullanılmıştır. Tezgahın devir sayıları ve ilerleme miktarları tezgah dişli kutusu ve ilerleme tertibatına bağlı olarak sabit sayılarda ayarlanabilmektedir. Bu nedenle, üretimi gerçekleştirilen kompozit numunelerin ve matris malzemesinin işlenmesi sırasında oluşan talaş kökleri, 0,1 mm/rev ilerleme miktarı, 1 mm kesme derinliği ve 75 m/min kesme hızı değerlerinde alınabilmektedir. SK, KBN ve ÇKE kesici takımların her biri için talaş kökü alma işlemleri yapılmıştır.

Talaş kökleri parça üzerinden el testeresi yardımıyla, zarar verilmeden kesilerek alınmış ve soğuk reçine içerisine gömülmüştür. Reçinenin katılaşmasından sonra, kompozitlerin mikroyapı fotoğrafları için gerçekleştirilen metalografik parlatma işlemleri bu numuneler içinde tekrarlanmıştır. Parlatma işlemi sonrasında optik mikroskopta talaş kökü fotoğrafları çekilmiştir.gghnj

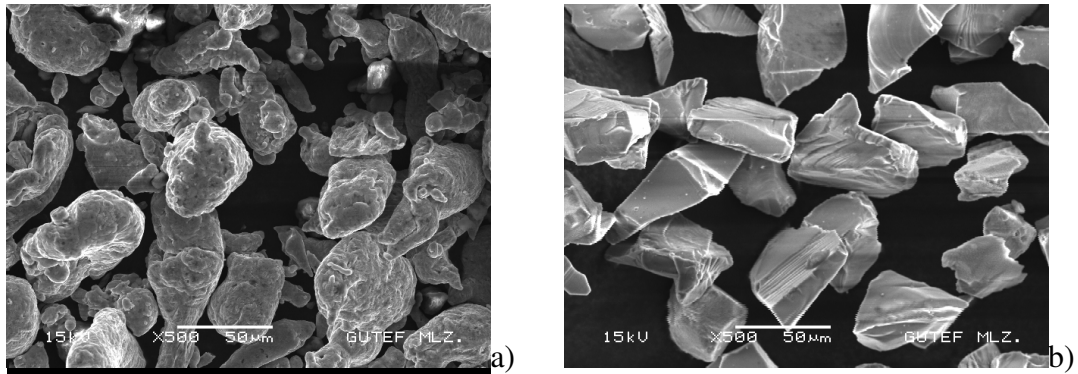
7. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

7.1. Malzeme Özellikleri

7.1.1. Matris ve takviye elemanının boyut analizi

Kompozit malzemelerin dayanım özelliklerini belirleyen en önemli etkenler matris ve takviye fazını oluşturan malzemenin biçimi ve boyutudur. Bu nedenle matris (Alumix 231) ve takviye elemanının (SiC_p) tarama elektron mikroskobu (SEM)'nda fotoğrafları çekilmiş ve elde edilen sonuçlar Resim 7.1'de verilmiştir.

Resim 7.1a'dan görülebileceği gibi, Alumix 231 tozunun en-boy oranlarının çok çeşitli ancak keskin köşeli olmayan biçimde olduğu tespit edilmiştir. SiC parçacıklarının ise ağırlıklı olarak en-boy oranlarının yaklaşık benzer, karmaşık keskin köşeli ve ince yassı plaka şeklinde olduğu tespit edilmiştir (Resim 7.1b).



Resim 7.1. Matris ve takviye elemanının SEM görüntüsü
a) Alumix 231, b) SiC_p

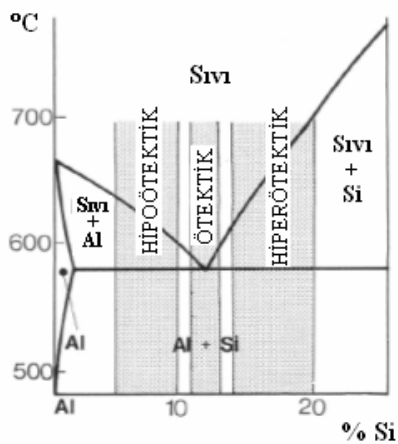
SEM fotoğraflarında yapılan incelemeler SiC parçacıklarının hepsinin de aynı form ve boyutta olmadıklarını göstermiştir. Bu nedenle parçacık boyutlarının net bir değerle sınırlandırılmayacağı ve ancak ortalama bir tane boyutu ile ifade edilebilecekleri anlaşılmıştır. Bu kapsamda parçacık boyut analizleri yapılmıştır.

Parçacık elek boyutuna (400 mesh) bağlı elde edilen analiz deney sonucu EK-1’de verilmiştir. EK-1’den görülebileceği üzere elek boyutuna göre %99,9 saflıktaki SiC parçacıkların ortalama tane boyutu $d(0,5)=20,1 \mu\text{m}$ ’dir. Deneylerde matris malzemesi olarak kullanılan Alumix 231 gaz atomizasyon yöntemine göre üretilmiş olup tane boyutu ortalama $63 \mu\text{m}$ ’dir [133].

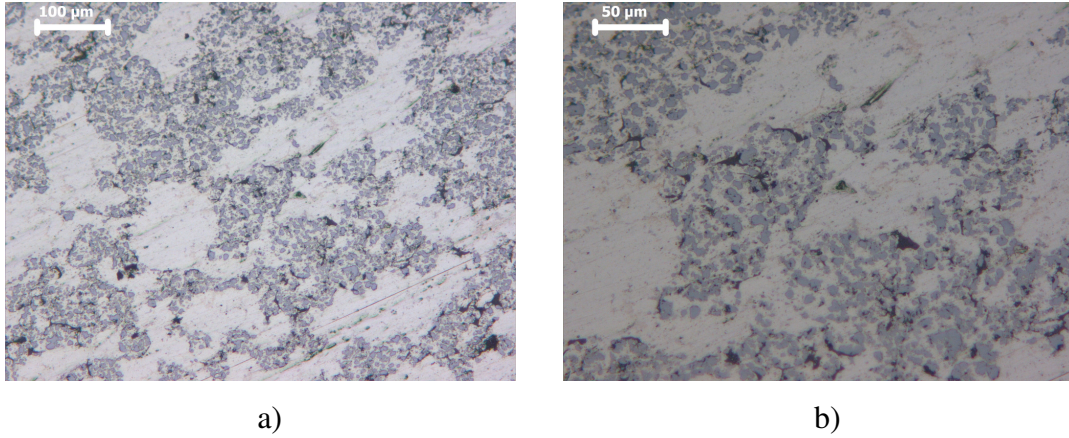
7.1.2. Kompozit numunelerin metalografik incelemeleri

Alumix 231 matrisli ve SiC parçacık takviyeli kompozit numuneler, 650 MPa basınç, 585 °C sinterleme sıcaklığı ve 60 dakika sinterleme süresi kullanılarak sıvı-faz sinterleme teorisine göre üretilmiş olup numunelerin metalografik çalışmalar sonucunda elde edilen mikroyapı fotoğrafları Resim 7.2-7.5 arasında gösterilmiştir.

Matris malzemesi olarak kullanılan Al-Si alaşımı Alumix 231 tozu kimyasal bileşimindeki %14 Si içeriği nedeniyle hiperötektik alaşımlar grubuna girmektedir [141]. Bu nedenle numunelerin, ötektik sıcaklığının (557 °C) (Bkz. Şekil 7.1) üzerindeki bir sıcaklıkta (585 °C) sinterlenmesinin sonucu olarak, mikroyapıda Resim 7.2’den görülebileceği gibi sert Si fazlarının oluştuğu görülmektedir.



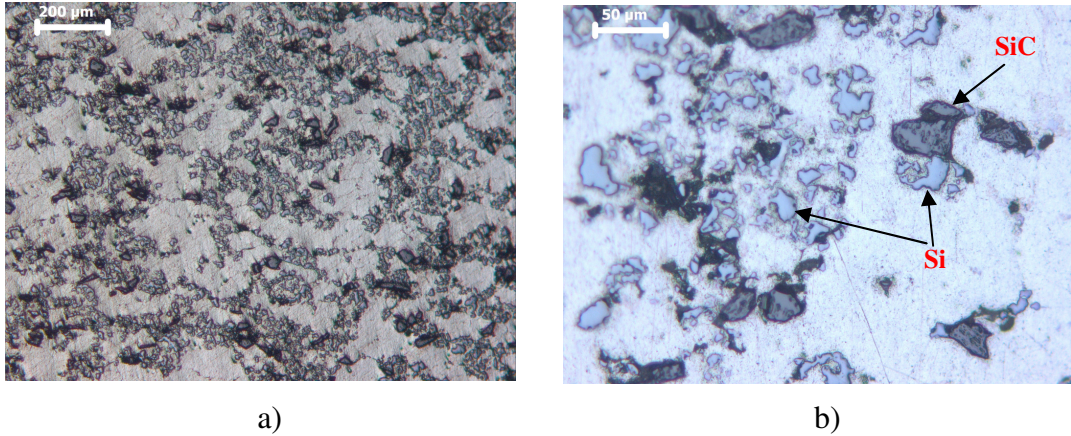
Şekil 7.1. Al-Si faz diyagramı [141]



Resim 7.2. Alumix 231 kodlu numunenin mikroyapı fotoğrafları
a) x50, b) x100 büyütme

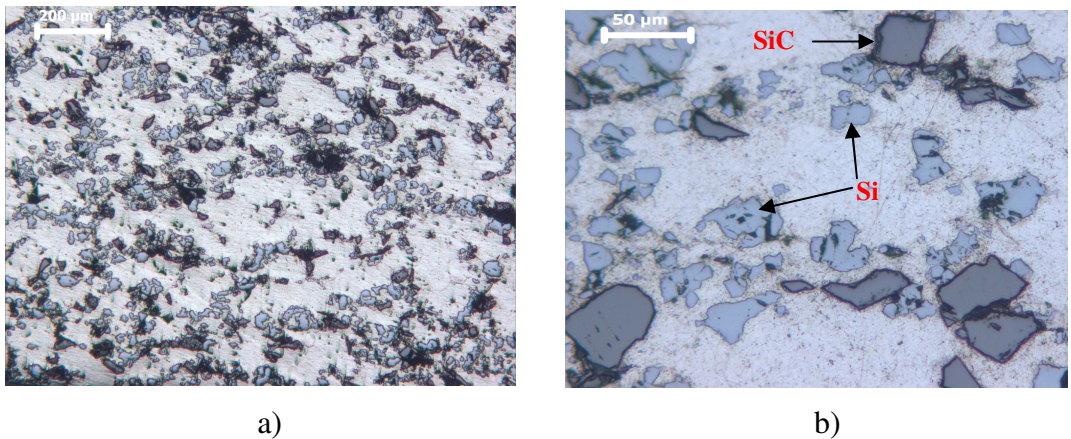
Resim 7.2'deki mikroyapı fotoğrafları dikkatlice incelenecek olursa, Si fazının homojen olarak dağılım sergilediği ve sinterleme sıcaklığının etkisinde tane sınırlarına doğru çekirdeklenme eğiliminde olduğu görülebilir. Mikroyapıda görülen siyah bölgeler, Alumix 231 tozunun alaşımlanması sırasında içine eklenen yağlayıcı madde (Wax) ve numunedeki gözenekleri temsil etmektedir. Mikroyapıdaki bu olumsuzlukların, sinterleme sırasında polimer yakma olarak bilinen yağlayıcı/bağlayıcı uçurma işlemi süresi ve sinterlemenin Ar ortamında ancak vakumlu olarak yapılmamasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Resim 7.3'ten SiC parçacıkların Alumix 231 matrisi içerisinde homojen bir dağılım sergilediği, ancak numunede yer yer gözeneklerin meydana geldiği görülmektedir. Gözenek oluşumunun çoğunlukla sinterleme problemlerinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Resim 7.3b incelendiğinde Si fazı boyutunun arttığı ve karmaşık biçimde oluştuğu, ayrıca Si fazların SiC parçacıklar etrafında heterojen bir dağılımla toplandığı görülmektedir. Si morfolojisinin bu şekilde oluşmasının temel nedeni kompozit yapı içindeki SiC parçacıkların olduğu bölgelerdeki ısı alan (matris malzemesi ile SiC parçacıklar arasındaki ısı uyumsuzluk) ve çözünme alanı (çözünen Si elementinin aralıklı difüzyonu) ile açıklanabilir [142].

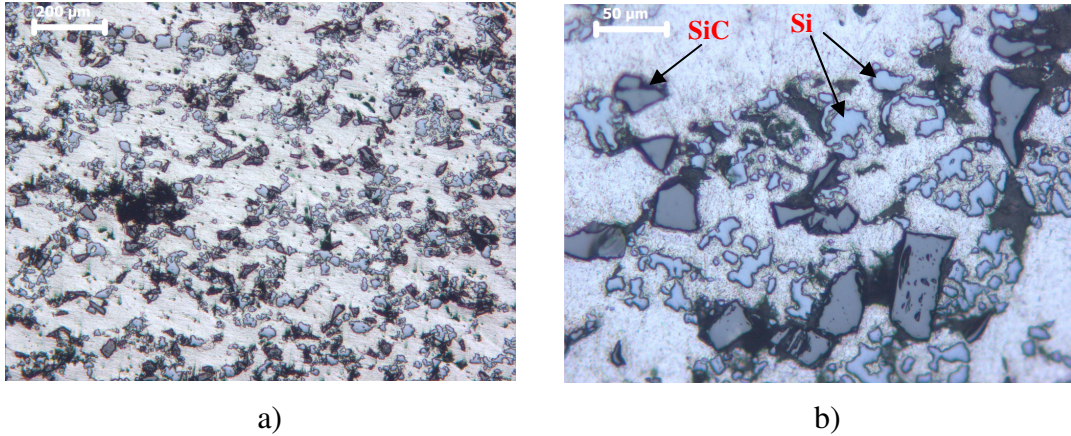


Resim 7.3. %5 SiC kodlu numunenin mikroyapı fotoğrafları
a) x50, b) x100 büyütme

Resim 7.4 değerlendirilecek olursa; %10 SiC kodlu numunede parçacıkların matris içerisinde genelde homojen bir dağılımda olduğu, ancak az da olsa gözeneklerin varlığı göze çarpmaktadır. Ayrıca kompozit numunde ağırlıkça artan SiC oranı nedeniyle parçacık ve matris arasındaki ısı uyumsuz alanların artmasına bağlı olarak Si fazının daha iri yapıda oluştuğunu söylemek mümkündür (Resim 7.4b). %15 SiC numunede, gözenek/yağlayıcı oluşumunun yer yer daha büyük alanda meydana geldiği görülmektedir. Bu durum sinterleme parametrelerinin yanı sıra SiC parçacıkların bulunduğu yerlerde, ergime derecesine yakın bir sıcaklığa ulaşan matris yapısındaki Si elementinin SiC parçacıklara doğru yaklaşması ile açıklanabilir. Bununla birlikte, numunedeki Si fazlarının çoğunlukla dallantılı olarak büyüdüğü görülmekte (Resim 7.5b) olup bu oluşum SiC oranının artmasına atfedilebilir [142].



Resim 7.4.%10 SiC kodlu numunenin mikroyapı fotoğrafları
a) x50, b) x100 büyütme



Resim 7.5. %15 SiC kodlu numunenin mikroyapı fotoğrafları
a) x50, b) x100 büyütme

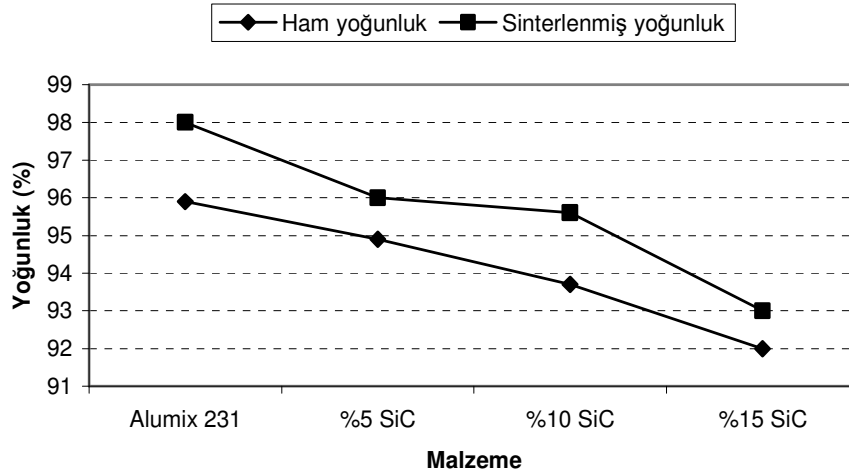
7.1.3. Yoğunluk sonuçlarının değerlendirilmesi

Alumix 231 ile %5, %10 ve %15 SiC takviyeli olarak üretilen numunelerin yoğunluk değerlerinin belirlenmesinde Arşimet prensibi uygulanmıştır. Yoğunluklar, çift yönlü sıkıştırma ile elde edilen burç şeklindeki numuneler üzerinden, ham yoğunluk ve sinterleme sonrası yoğunluk olmak üzere iki şekilde hesaplanmıştır. Çizelge 7.1’de kompozit numunelerin 650 MPa basınçta preslendikten sonraki ham yoğunlukları ve 585 °C’de 1 saat sinterleme sonrası yoğunlukları verilmiştir.

Çizelge 7.1. Malzemelerin ham yoğunluk ve sinterleme sonrası yoğunlukları

Numune kodu	Teorik yoğunluk (gr/cm^3)	Ham yoğunluk (%)	Sinterlenmiş yoğunluk (gr/cm^3)	Teorik yoğunluk (%)
Alumix 231	2,56	95,9	2,509	98
%5 SiC	2,59	94,9	2,49	96
%10 SiC	2,624	93,7	2,51	95
%15 SiC	2,656	92	2,475	93

Üretilen numunelerin ham ve sinterlenmiş yoğunluk değerleri ile teorik yoğunluğun yüzde olarak karşılaştırılması Şekil 7.2’de verilmiştir.



Şekil 7.2. Numunelerin ham ve sinterlenmiş yoğunluklarının karşılaştırılması

Çizelge 7.1 ve Şekil 7.2’den görülebileceği gibi en yüksek ham ve sinterlenmiş yoğunluk matris malzemesi olarak kullanılan Alumix 231 tozundan üretilen numunelerde elde edilmiştir. Bu numune için ulaşılan en büyük *teorik yoğunluk* %98’dir. Kompozit numunelerin yoğunlukları incelendiğinde, takviye malzemesi ağırlık oranının artmasıyla teorik yoğunluk değerinin arttığı görülmektedir (Çizelge 7.1). Bunun nedeni, SiC parçacık yoğunluğunun Alumix 231 tozun yoğunluğundan yüksek olmasıdır. Diğer yandan takviye oranının artmasıyla ham yoğunluk yüzdesinin azaldığı görülmektedir. Ham yoğunluktaki bu azalmanın nedeni olarak; SiC parçacıkların sertliğinden dolayı karışım tozun sıkıştırmaya daha dirençli hale gelmesiyle sıkıştırılabilirliğin kötüleşmesi [99], parçacık takviye miktarının artmasına paralel olarak artan matris/takviye arayüzey alanının artması ve bunun da gözenekliliği artırması gösterilebilir. Numunelerin sinterlenmesiyle, Alumix 231 ve %10 SiC kodlu numunelerde %2, %5 SiC ve %15 SiC kodlu numunelerde %1,2 yoğunluk artışı sağlanmıştır. Kompozit numunelerin yoğunluklarındaki bu değişimin SiC parçacıkların dağılımından kaynaklandığı düşünülmekte olup %10 SiC kodlu numunede daha homojen dağılımın gerçekleştiği ve gözenek/yağlayıcı oluşumunun daha az olduğu görülmektedir (Resim 7.4a). Kompozit numuneler arasındaki en düşük teorik yoğunluk %15 SiC kodlu numune için %93 olarak ölçülmüştür. Bunun nedeni olarak parçacık oranının artmasıyla beraber artan gözenek oluşumunun daha fazla miktarlarda olması gösterilebilir.

7.1.4. Sertlik ve çapraz kırılma mukavemeti

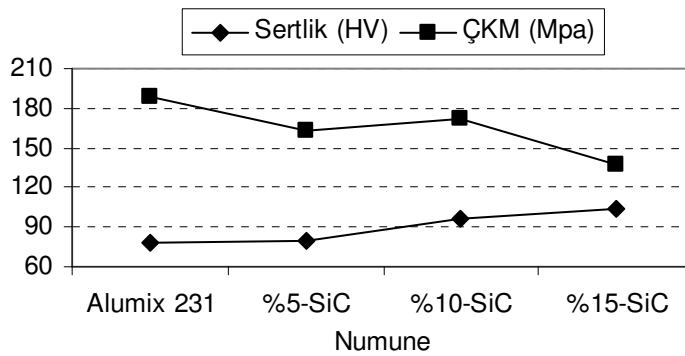
Üretilen malzemelerin sertlik ve çapraz kırılma mukavemeti (ÇKM) değerleri Çizelge 7.2’de verilmiştir.

Çizelge 7.2. Numunelerin sertlik ve ÇKM değerleri

Numune	Sertlik (VH5)	ÇKM (MPa)
Alumix 231	78	189
%5-SiC	80	163
%10-SiC	96	172
%15-SiC	104	138

Çizelge 7.2 incelendiğinde matris malzemesine göre kompozit numunelerin sertlik değerlerinin daha yüksek olduğu görülmektedir. Kompozitlerin kendi aralarında sertlik değerleri incelendiğinde, takviye elemanı ağırlık oranındaki artışa paralel olarak sertliğin arttığı görülmektedir. Sertlikteki bu artış, takviye miktarının artması ve sinterleme sırasında SiC_p’lar etrafında çekirdeklenen Si fazı boyutunun büyümesiyle açıklanabilir. En yüksek sertlik değeri, ağırlıkça %15 oranında SiC parçacıklarla takviyeli kompozit numunede ölçülmüştür.

Çizelge 7.2’deki sertlik ile ÇKM değerleri kullanılarak numunelerin mekanik özelliklerindeki değişim Şekil 7.3’de grafik olarak gösterilmiştir.



Şekil 7.3. Numunelerin sertlik ve çapraz kırılma mukavemetindeki değişimler

Şekil 7.3 incelendiğinde, takviye miktarının artmasıyla numunelerin sertlik değerlerinde artış eğilimi gözlenirken, çapraz kırılma mukavemeti değerlerinde ise daha farklı bir eğilim görülmektedir. Kompozit numuneler arasında en yüksek ÇKM değeri %10 SiC kodlu numunede elde edilmiştir. Bu sonucun, SiC parçacıklarının daha homojen dağılımı ve gözenek miktarının daha az olmasına bağlı olarak, ÇKM deneyleri sırasında mikroyapıdaki çatlak ilerlemesinin daha yavaş olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Çizelge 7.2'den de görülebileceği gibi en düşük ÇKM değeri %15 SiC kodlu numunede ölçülmüştür. Bu durumun, %15 SiC takviye içeren kompozit malzemenin yoğunluğunun azalmasına da sebep olan gözenek/yağlayıcı yoğunluğuna bağlı olduğu düşünülmektedir [143].

7.2. İşlenebilirlik Özellikleri

Üretiminde toz metalurjisi yönteminin kullanıldığı burç şeklindeki kompozit numunelerin işlenebilirlik özellikleri, talaşlı imalatla çok sık kullanılan tornalama işlemiyle gerçekleştirilmiştir. Kesme deneyleri, ISO 3685 dikkate alınarak belirlenmiş kesme parametreleri (kesme hızı, ilerleme, kesme derinliği) kullanılarak yapılmış olup deneylerin her biri için yeni kesici takım kullanılmıştır. Üretilen kompozit malzemelerin işlenebilirliği; kesme kuvvetleri, kesici takım malzemesi, yüzey pürüzlülüğü, talaş biçimleri ve talaş kökü morfolojisi açısından değerlendirilmiştir.

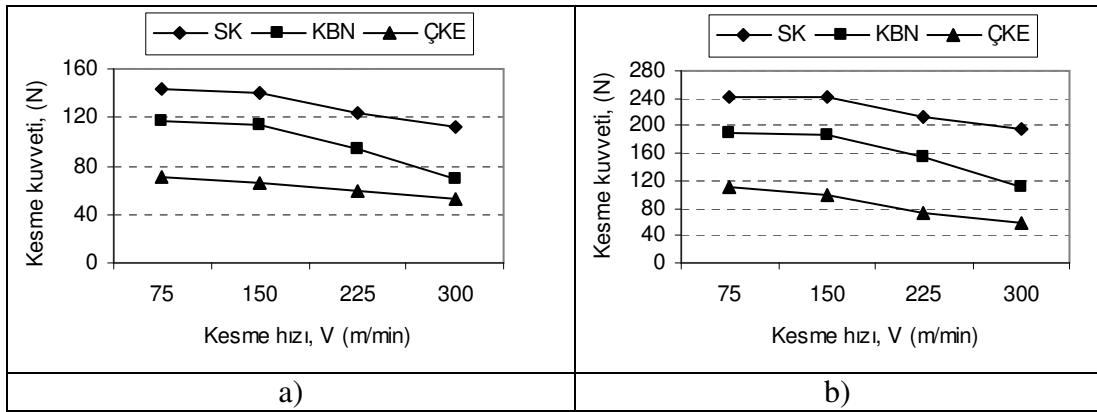
7.2.1. Kesme kuvvetlerinin değerlendirilmesi

Malzemenin işlenebilirliğinin değerlendirilmesinde temel kriterlerden birisi kesme kuvvetleri veya talaş kaldırmak için gerekli güçtür [123]. Bu amaçla, burç şeklinde üretilen numuneler için yapılan kesme kuvveti ölçüm deneylerine başlamadan önce numuneler bağlama aparatına takılmış ve yüzeylerinden 0,25 mm derinlikte talaş kaldırılmıştır. Yapılan bu işlem ile numunelerin bağlanmasından kaynaklanan dönme eksantrikliği ile sinterleme sonrası yüzeylerdeki olumsuzluklar giderilerek, ölçülecek kesme kuvvetlerinin güvenilirliği sağlanmıştır. Kesme kuvvetlerinin ölçümü, belirlenen kesme parametrelerine bağlı olarak her bir numune için 15 mm boyda

silindirik tornalama yapılarak gerçekleştirilmiştir. Tornalama sırasında oluşan kesme kuvvetleri esas kesme kuvveti (F_c), ilerleme kuvveti (F_f) ve radyal kuvvet (F_r) olarak üç yönde ölçülmüştür. Her deney iki defa tekrarlanmış ve iki kesme işlemi sonucunda elde edilen kesme kuvvetlerinin ortalamaları alınmıştır. Alumix 231, %5 SiC, % 10 SiC ve %15 SiC kodlu numunelerin işlenebilirliğinin kesme kuvvetleri açısından daha detaylı incelenebilmesi için kesme parametreleri ile kesme kuvvetleri arasındaki değişimleri gösteren grafikler oluşturulmuştur.

Alumix 231 kodlu numunenin işlenebilirliğinde kesme kuvvetlerinin değerlendirilmesi

Alumix 231 kodlu numune için kesme hızı ve ilerleme miktarına göre oluşan esas kesme kuvvetinin değişimi, kesici takım malzemeleri açısından Şekil 7.4'de sunulmuştur.



Şekil 7.4. Alumix 231 kodlu numune için kesme hızına göre F_c değişimi
a) $f=0,1$ mm/rev; b) $f=0,2$ mm/rev

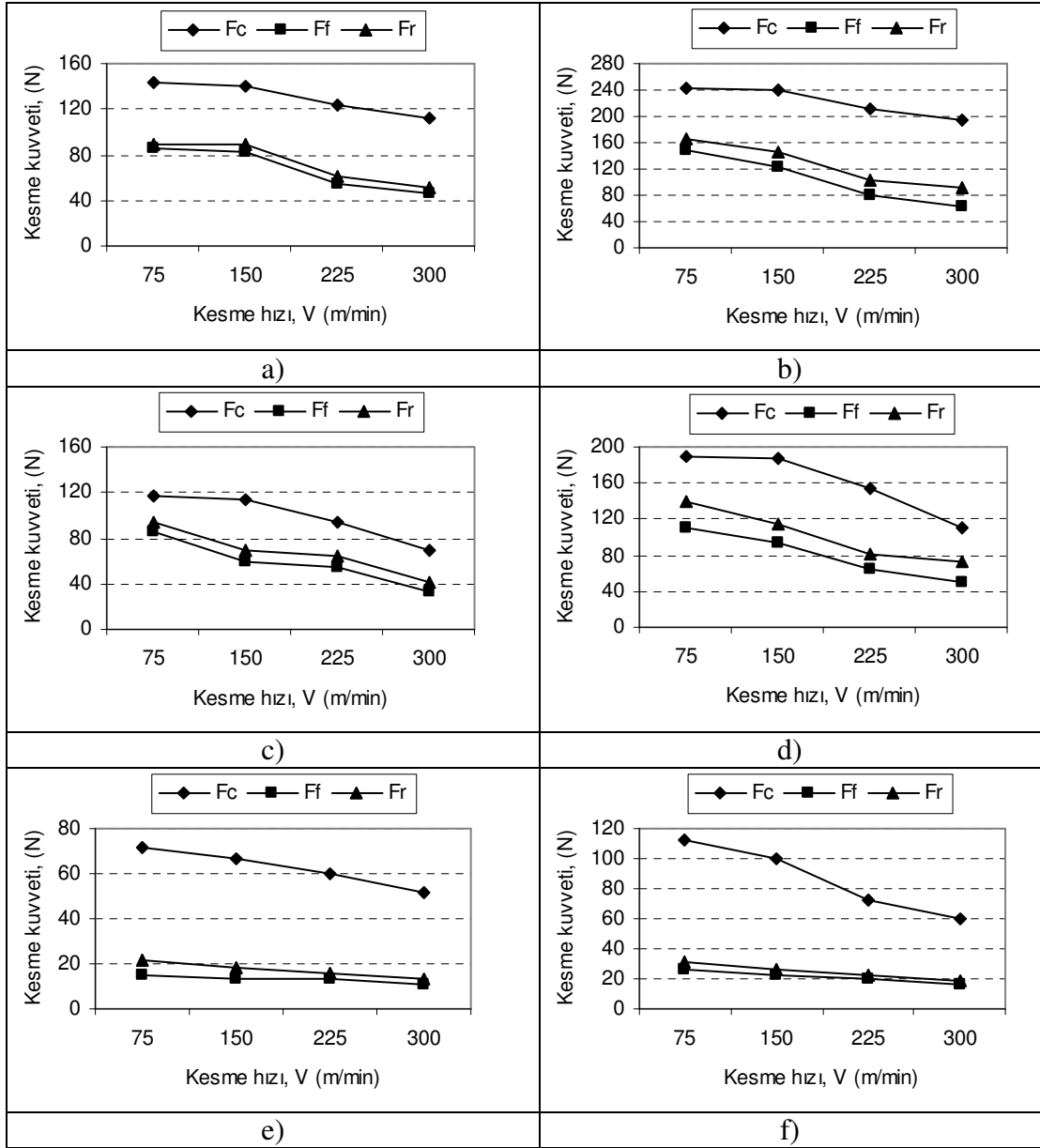
Şekil 7.4 incelenerek genel bir değerlendirme yapılırsa; SK, KBN ve ÇKE kesiciler için kesme hızındaki artışla beraber F_c 'nin benzer bir eğilim sergileyerek azaldığı görülmektedir. SK ve KBN kesicilerde kesme hızının 75 m/min'den 150 m/min'e artırılmasıyla F_c 'de kayda değer bir azalma görülmezken ÇKE kesicide doğrusal bir azalmadan söz etmek mümkündür. Bu durumun, ÇKE kesici takımın sürtünme katsayısının diğer kesici takım malzemelerine göre daha düşük olmasından

kaynaklandığı düşünülmektedir. Kesicilerin tamamında, kesme hızının 150 m/min'den sonraki değerleri F_c 'nin azalma eğiliminde olduğu görülmektedir. F_c 'deki bu azalmanın asıl nedeni, kesme hızının artmasıyla artan sıcaklığa bağlı olarak deformasyonun kolaylaşması ve işparçasındaki ısı yumuşama neticesinde takım-talaş ara yüzeyindeki sürtünmenin azalması olarak gösterilebilir [123, 131].

İlerleme miktarındaki artışla beraber F_c değerlerinin de arttığı görülmekte olup bunun asıl nedeni ilerlemedeki artışla birlikte talaş kesitindeki artış olduğu düşünülmektedir. Alumix 231 matris malzemesinin işlenmesinde oluşan en yüksek F_c değeri (243,26 N), SK kesici takımla 75 m/min kesme hızı ve 0,2 mm/rev ilerleme miktarında ölçülmüştür. En düşük F_c değeri (52,07 N) ise ÇKE kesici takım malzemesiyle 300 m/min kesme hızı ve 0,1 mm/rev ilerleme miktarında işlenmesiyle ortaya çıkmıştır.

Alumix 231 kodlu numunenin tornalanması sırasında oluşan F_c kuvveti, kesici takım malzemeleri açısından değerlendirilecek olursa; 0,1 mm/rev ilerleme ve 75 m/min kesme hızı için F_c değerlerinde, SK'ye göre KBN kesicide %18, ÇKE kesicide %49'luk azalma hesaplanmıştır. Aynı ilerleme miktarı için F_c değerinde, kesme hızının 300 m/min'e çıkarılmasıyla KBN kesicide %37, ÇKE kesicide %53,5'lik bir azalma meydana gelmiştir. İlerleme miktarının 0,2 mm/rev'e çıkarılmasıyla beraber F_c 'ye bağlı bu oranlama; 75 m/min kesme hızı için KBN kesicide %21,8, ÇKE kesicide % 53,8 olurken, 300 m/min kesme hızı için KBN kesicide %43, ÇKE kesicide %69 şeklinde hesaplanmıştır. İlerlemedeki artışla birlikte KBN ve ÇKE kesici takımlar için F_c 'deki azalma oranının artması, işparçası deformasyonunun daha kısa sürede gerçekleşmesi ve kısmen de olsa takım malzemelerinin sürtünme katsayılarının düşük olmasına [126, 139] bağlı olarak, ikinci deformasyon bölgesinde herhangi bir talaş yapışmasının oluşmaması ile açıklanabilir.

Şekil 7.5'de Alumix 231 kodlu numunenin SK, KBN ve ÇKE kesici takım malzemeleriyle iki farklı ilerleme miktarı ve dört farklı kesme hızıyla işlenmesinde oluşan kesme kuvveti bileşenlerinin değişimleri grafikler halinde verilmiştir.



Şekil 7.5. AluMIX 231 kodlu numune için kesici takım malzemelerine göre kesme kuvvetlerinin değişimi

a) SK kesici, $f = 0,1$ mm/rev, b) SK kesici, $f = 0,2$ mm/rev

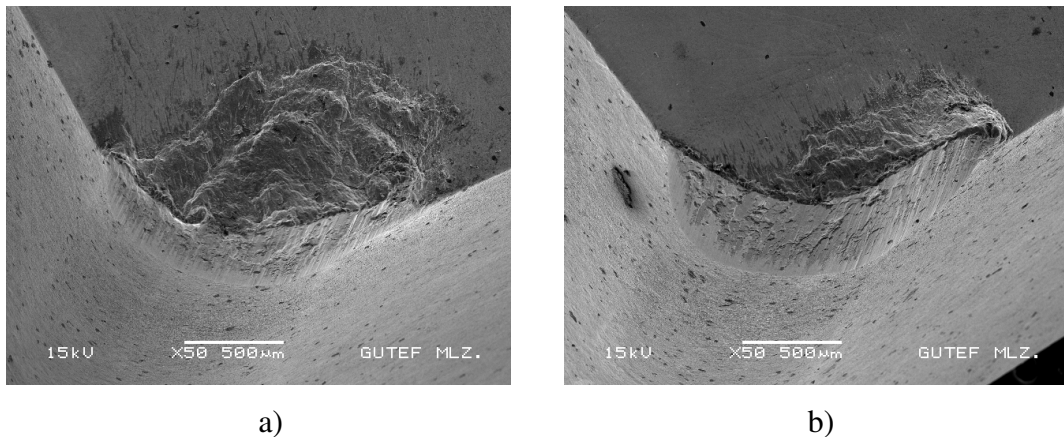
c) KBN kesici, $f = 0,1$ mm/rev, d) KBN kesici, $f = 0,2$ mm/rev

e) ÇKE kesici, $f = 0,1$ mm/rev, f) ÇKE kesici, $f = 0,2$ mm/rev

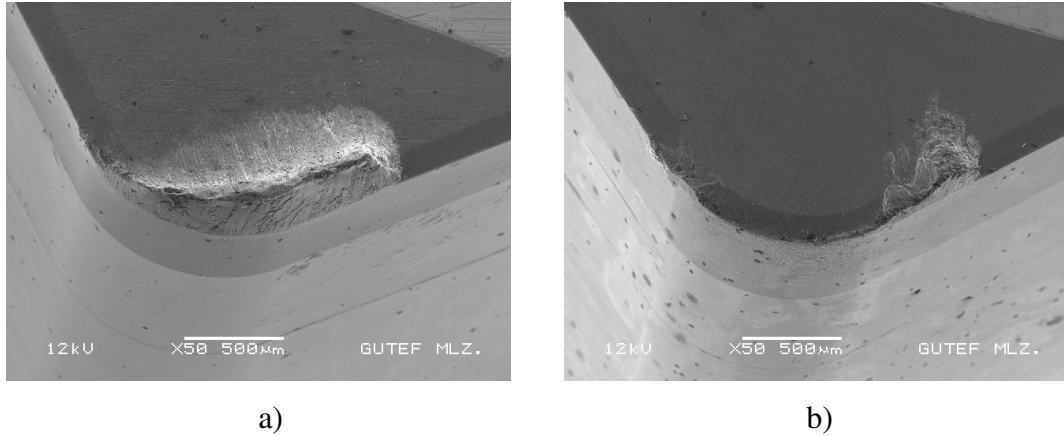
Şekil 7.5’deki grafikler topluca değerlendirilirse; kesme hızının artırılmasıyla kesme kuvveti bileşenlerinin tümünde (Fc, Ff ve Fr) bir azalma eğilimi görülmektedir. İlerleme miktarı açısından grafikler incelendiğinde; ilerlemenin 0,1 mm/rev’den 0,2

mm/rev'e çıkmasıyla artan talaş kesitiyle doğru orantılı olarak kesme kuvvetlerinde bir artıştan söz etmek mümkündür.

Kesme kuvveti bileşenleri değerlendirilecek olursa; bütün kesici takımlarda kesme hızının artmasıyla esas kesme kuvveti (F_c)'nin azaldığı görülmektedir. Kesme şartlarının tamamında F_c kuvveti en yüksek olarak ölçülürken, ilerleme kuvveti (F_f) ile radyal kuvvet (F_r) arasında alışılmışın dışında bir eğilim meydana gelmiştir. Literatürde, radyal kuvvetin ilerleme kuvvetinin %50'si kadar olduğundan söz edilmektedir [126]. Ancak, Şekil 7.5'deki grafiklerden görülebileceği gibi Alumix 231 kodlu numunenin işlenmesi sonucunda, hem kesme parametreleri hem de kesici takım malzemelerinin tamamında, radyal kuvvet ilerleme kuvvetinden daha büyük oluşmuştur. Bu durumun, çoğunlukla kesici takım yanaşma açısının 75° [124] ve kısmen de olsa takım etkin talaş açısının $\gamma=-6^\circ$ olması nedeniyle meydana gelen talaş oluşumunun bir sonucu olduğu düşünülmektedir. Ayrıca, sünek malzemelerin özellikle düşük kesme hızlarında işlenmesinde meydana gelen yığıntı talaş (YT), kesici takım radiusünü büyütürken takımın malzemeye batmasını zorlaştıracığından [45], kesme kuvvetlerinin, özellikle F_r 'nin büyümesine yol açacaktır. SK ve KBN kesici takımlarla yapılan kesme işlemlerinde, kesici takım burun bölgesinde özellikle düşük kesme hızlarında YT katmanının oluştuğu görülmektedir (Resim 7.6a - Resim 7.7a).



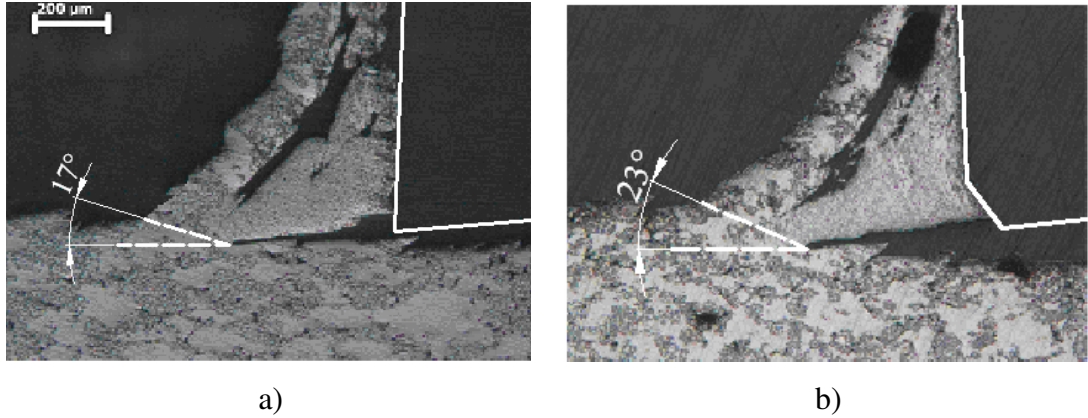
Resim 7.6. Alumix 231 kodlu numunenin SK ile işlenmesinde oluşan SEM görüntüleri
a) $V=75$ m/min, $f=0,1$ mm/rev, b) $V=300$ m/min, $f=0,1$ mm/rev



Resim 7.7. Alumix 231 kodlu numunenin KBN ile işlenmesinde oluşan SEM görüntüleri

a) $V=75$ m/min, $f=0,1$ mm/rev, b) $V=300$ m/min, $f=0,1$ mm/rev

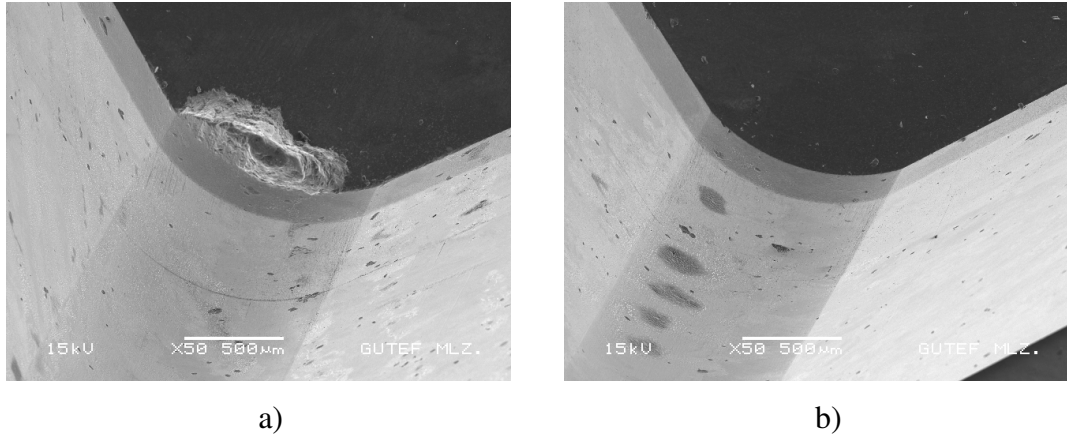
75 m/min kesme hızı ve 0,1 mm/rev ilerlemede kesici takımlarda meydana gelen YT katmanının, SK kesicide asıl kesici kenar, burun bölgesi ve yardımcı kesici kenar boyunca oluştuğu, KBN kesicide ise asıl kesici kenar ve burun bölgesinde olduğu görülmektedir. KBN kesicide YT katmanının daha sınırlı bir bölgede oluşması bu kesici takımın SK'e göre daha düşük sürtünme katsayısına sahip olmasına atfedilebilir. Her iki kesicinin burun bölgesinde oluşan YT katmanı, kesici takım geometrisini değiştirerek birinci deformasyon bölgesinde kayma düzlemi açısının azalmasına ve dolayısıyla takım-talaş temas uzunluğunu artmasına neden olmuştur. 75 m/min kesme hızı ve 0,1 mm/rev ilerleme miktarı için alınan talaş kökü fotoğraflarından görülebileceği gibi SK kesicide kayma düzlemi açısı 17° olurken (Resim 7.8a), KBN'de 23° olarak meydana gelmiştir (Resim 7.8b). Kayma düzlemi açısının küçük olmasına bağlı olarak artan YT'nin, ikinci deformasyon bölgesinde oluşan takım-talaş arayüzeyindeki sürtünme kuvvetlerinin artmasına ve böylece kesme kuvvetlerinin yükselmesine neden olduğu düşünülmektedir.



Resim 7.8. Alumix 231 kodlu numunede 0,1 mm/rev ilerleme ve 75 m/min kesme hızında oluşan talaş kökü
a) SK kesici takım, b) KBN kesici takım

Kesme hızının artmasıyla birlikte KBN kesici takımdaki YT katmanı azalırken, SK kesicide oluşan YT katmanı alanının azaldığı ancak YT yüksekliğinin arttığı görülmektedir (Resim 7.6b ve Resim 7.7b). SK kesicide meydana gelen bu durum, Alumix 231 kodlu numune içerisindeki Si fazının yüksek hızda (300 m/min) kesme işlemi sırasında sert parçacık gibi davranarak kesici takımın burun bölgesinde aşınmasıyla açıklanabilir. SK kesici takımın burun bölgesindeki aşınmasına bağlı olarak kısmen de olsa kesici takım sürtünme katsayısı artacak ve böylece YT katmanının oluşumu daha da kolaylaşacaktır. SK kesici takımda ortaya çıkan bu durum, kesme hızının 225 m/min'den 300 m/min'e artırılmasında F_r ve F_f kuvvetlerindeki azalma eğilimini yavaşlatmıştır (Şekil 7.5a).

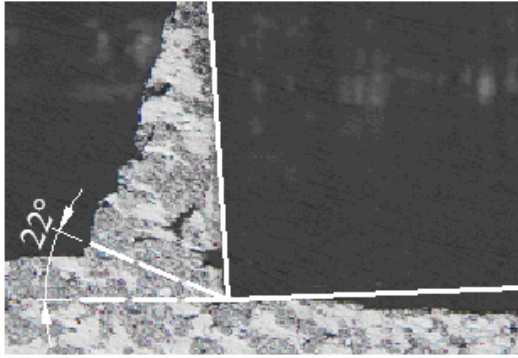
Resim 7.9'da Alumix 231 kodlu numunenin ÇKE kesici takımla işlenmesi sonrasında kesici takımlardan çekilen SEM görüntüleri verilmiştir.



Resim 7.9. Alumix 231 kodlu numunenin ÇKE ile işlenmesinde oluşan SEM görüntüleri
a) $V=75$ m/min, $f=0,1$ mm/rev, b) $V=300$ m/min, $f=0,1$ mm/rev

Alumix 231 kodlu numunenin 0,1 mm/rev ilerleme miktarı ve 75 m/min kesme hızıyla ÇKE ile işlenmesi sırasında kesici takımın burnunda çok az da olsa YT katmanının oluştuğu görülmektedir. Düşük kesme hızında birinci deformasyon bölgesinde oluşan düşük sıcaklık talaş oluşumunu zorlaştıracak ve bu oluşum ikinci deformasyon bölgesinde takım-talaş ara yüzeyinde sürtünmenin artmasına neden olacaktır. Bu nedenle, ÇKE kesici takımın sürtünme katsayısı SK ve KBN kesici takımlara göre daha düşük olmasına rağmen YT oluşumuna sebep olduğu düşünülmektedir. Kesme hızının 300 m/min'e çıkarılmasıyla kesici takımda herhangi bir YT oluşumu gerçekleşmemiştir. Bu durum, kesme hızının artmasıyla takım-talaş ara yüzeyindeki sıcaklığın artmasına bağlı olarak talaş akışının kolaylaşması ile açıklanabilir [41, 45].

ÇKE kesici takımda 0,1 mm/rev ilerleme miktarı ve 75 m/min kesme hızında YT katmanının oluşumu gözlemlense de, bunun sürekli bir talaş yapışması şeklinde olmadığı talaş kökü incelemelerinden tespit edilmiştir (Resim 7.10).

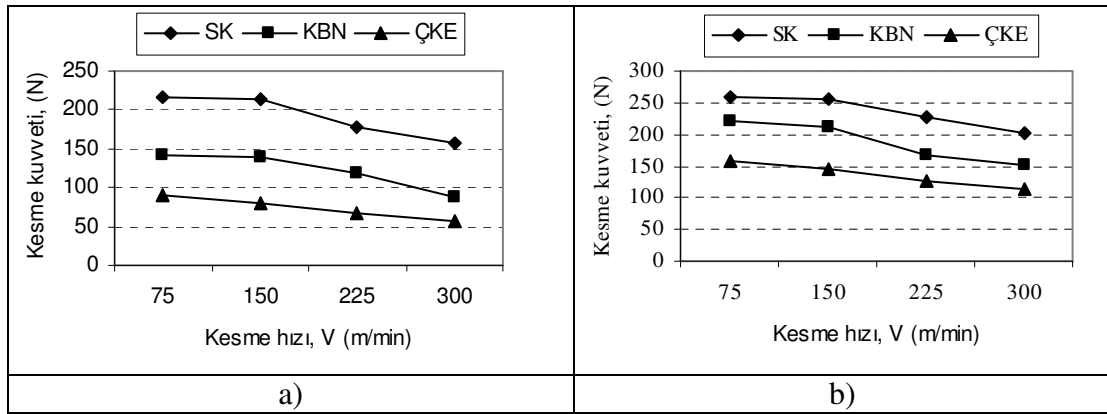


Resim 7.10. Alumix 231 kodlu numunenin ÇKE ile işlenmesinde oluşan talaş kökü fotoğrafı

Alumix 231 kodlu numune için ölçülen kesme kuvveti bileşenlerinin, kesici takım malzemelerinin hepsinde büyükten küçüğe doğru F_c , F_r ve F_f şeklinde meydana geldiği görülmektedir (Şekil 7.5). En düşük kesme kuvvetleri, ÇKE kesici takımla 0,1 mm/rev ilerleme ve 300 m/min kesme hızında yapılan kesme işlemi sonucunda $F_c=52,07$ N, $F_r=12,92$ N ve $F_f=10,8$ N olarak ölçülmüştür. Bu değerler en hafif kesme şartlarında bile radyal kuvvetin ilerleme kuvvetinden daha fazla olduğunu göstermektedir. Kesme hızı ve ilerleme miktarının en düşük olduğu kesme şartında ($f=0,1$ mm/rev, $V=75$ m/min), SK kesici takımla yapılan kesme işlemi sonucunda F_r/F_f oranı %4 iken, bu oran KBN'de %10, ÇKE'de %42 olarak hesaplanmıştır. Kesme hızının 300 m/min'e artırılmasıyla bu oranlama; SK'de %9, KBN'de %23, ÇKE'de %19 şeklinde gerçekleşmiştir. İlerleme miktarının iki katına çıkmasıyla F_r/F_f oranı, 75 m/min kesme hızında SK'de %10, KBN'de %26, ÇKE'de %19; 300 m/min kesme hızında SK'de %47, KBN'de %48, ÇKE'de %18 şeklinde olmuştur.

%5 SiC kodlu numunenin işlenebilirliğinde kesme kuvvetlerinin değerlendirilmesi

%5 SiC kodlu numune için kesme hızı ve ilerleme miktarına göre oluşan esas kesme kuvvetinin değişimi kesici takım malzemeleri açısından Şekil 7.6’da verilmiştir.



Şekil 7.6. %5 SiC kodlu numune için kesme hızına göre Fc değişimi
a) f= 0,1 mm/rev, b) f= 0,2 mm/rev

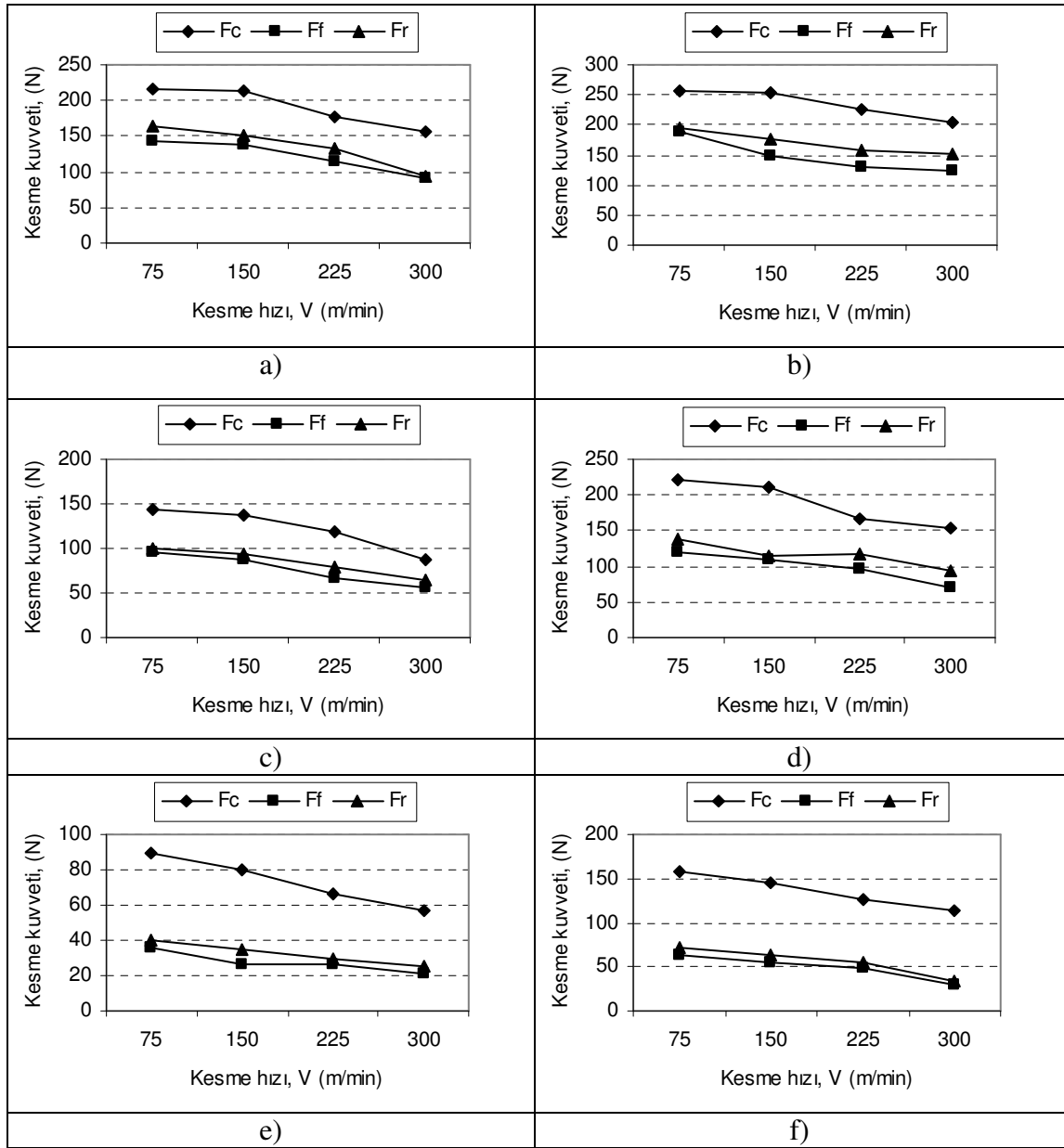
Şekil 7.6’daki grafikler incelendiğinde; SK, KBN ve ÇKE kesiciler için Fc kuvvetlerinin Alumix 231 kodlu numunedeki grafiklere benzer bir eğilim sergilediği görülmektedir. Benzer şekilde SK ve KBN kesicilerde, kesme hızının 75 m/min’den 150 m/min’e artırılmasıyla Fc’de önemli bir azalma görülmezken ÇKE’de kısmi bir azalma söz konusudur. Kesicilerin tamamında, kesme hızının 150 m/min’den sonraki değerlerinde, Fc’nin azalma eğiliminde olduğu görülmektedir. Fc’deki bu azalma, kesme hızının artmasıyla kesme bölgesinde meydana gelen ısının artmasına bağlı olarak takım-talaş ara yüzeyinde sürtünme kuvvetlerinin azalması ve dolayısıyla ikinci deformasyon bölgesinde talaş akışının kolaylaşmasına atfedilebilir [116].

Kesme parametreleri seviyelerinin aynı olduğu düşünülecek olursa, %5 SiC kodlu numune dayanımının Alumix 231’e göre daha yüksek olması, bu numunenin işlenmesinde oluşan kesme kuvvetlerinin yükselmesine sebep olmuştur (Bkz. Şekil 7.5-7.6). İlerleme miktarındaki artışla beraber talaş kesitinin artırılmasına bağlı olarak Fc değerleri de artış göstermiştir. %5 SiC kodlu kompozit malzemenin SK kesici

takımla 75 m/min kesme hızı ve 0,2 mm/rev ilerleme miktarında işlemede en yüksek F_c değerine (257,87 N) ulaşılmıştır. En düşük F_c değeri (57,02 N) ise ÇKE kesici takım malzemesiyle 300 m/min kesme hızı ve 0,1 mm/rev ilerleme miktarında işlemede ortaya çıkmıştır. %5 SiC kodlu numunede oluşan F_c kuvvetleri, kesici takım malzemeleri açısından değerlendirilecek olursa; 0,1 mm/rev ilerleme ve 75 m/min kesme hızı için F_c değerlerinde, SK'ye göre KBN kesicide %33, ÇKE kesicide %58'lik bir azalma hesaplanmıştır. Aynı ilerleme miktarı için F_c değerinde, kesme hızının 300 m/min'e çıkarılmasıyla KBN kesicide %44, ÇKE kesicide %64'lük bir azalma meydana gelmiştir. İlerleme miktarının 0,2 mm/rev'e çıkarılmasıyla beraber F_c 'ye bağlı bu oranlama; 75 m/min kesme hızı için KBN kesicide %15, ÇKE kesicide %38 olurken, 300 m/min kesme hızı için KBN kesicide %25, ÇKE kesicide %44 şeklinde hesaplanmıştır. İlerlemedeki artışla birlikte KBN ve ÇKE kesici takımlar için F_c 'de meydana gelen bu durum, mikroyapıdaki gözeneklilik sonucu oluşan düşük çapraz kırılma dayanımı neticesinde kesme sırasında meydana gelen plastik deformasyonun kolaylaşması ile açıklanabilir.

Şekil 7.7'de %5 SiC kodlu numunenin SK, KBN ve ÇKE kesici takım malzemeleriyle iki farklı ilerleme miktarı ve dört farklı kesme hızıyla işlenmesinde oluşan kesme kuvveti bileşenleri (F_c , F_f ve F_r)'nin değişimleri grafikler halinde verilmiştir.

Şekil 7.7'deki grafikler incelendiğinde; kesme hızının artırılmasıyla kesme kuvveti bileşenlerinin tümünde (F_c , F_f ve F_r) bir azalma eğilimi görülmektedir. İlerleme miktarı açısından genel bir değerlendirme yapıldığında; ilerlemenin 0,1 mm/rev'den 0,2 mm/rev'e çıkmasıyla artan talaş kesitine bağlı olarak kesme kuvvetlerinin arttığını söylemek mümkündür.



Şekil 7.7. %5 SiC kodlu numune için kesici takım malzemelerine göre kesme kuvvetlerinin değişimi

a) SK kesici, $f = 0,1$ mm/rev, b) SK kesici, $f = 0,2$ mm/rev

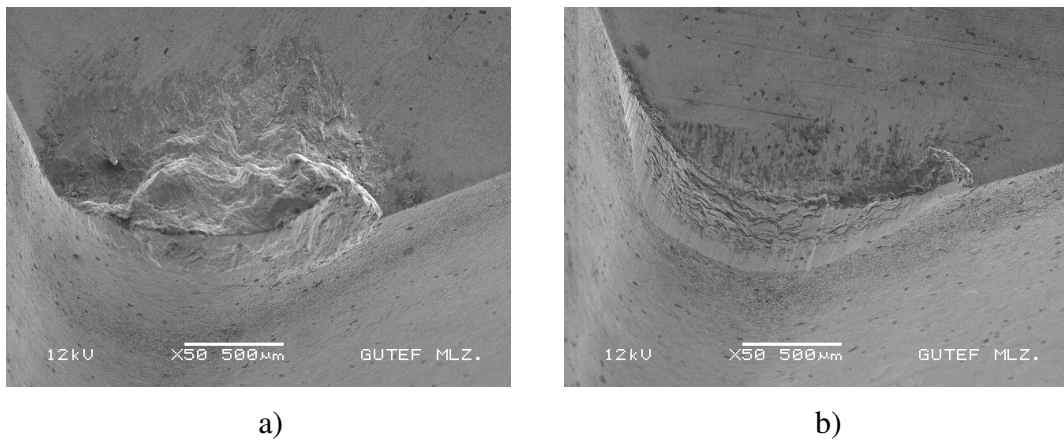
c) KBN kesici, $f = 0,1$ mm/rev, d) KBN kesici, $f = 0,2$ mm/rev

e) ÇKE kesici, $f = 0,1$ mm/rev, f) ÇKE kesici, $f = 0,2$ mm/rev

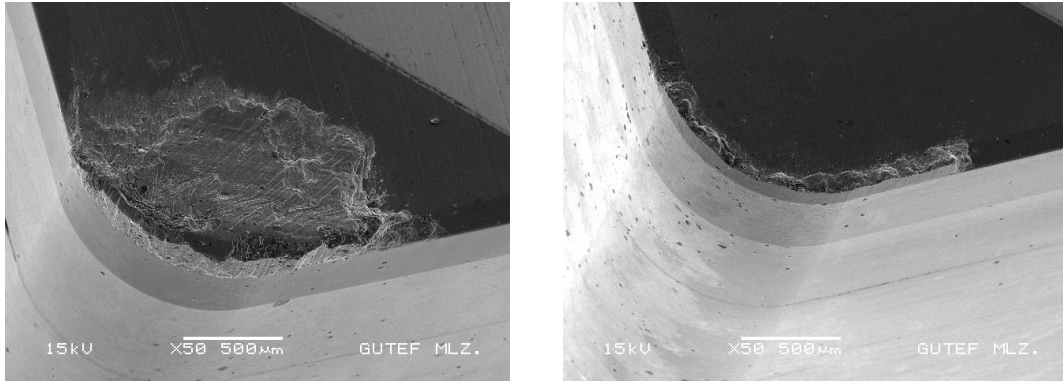
Kesme kuvveti bileşenleri ayrı ayrı değerlendirilecek olursa; SK kesiciyle kesme hızının 75 m/min'den 150 m/min'e çıktığı kesme deneyi hariç, bütün kesici takımlarda kesme hızının artmasıyla esas kesme kuvveti (F_c)'nin azaldığı

görülmektedir. Kesme şartlarının tamamında F_c kuvveti en yüksek olarak ölçülürken, ilerleme kuvveti (F_f) ile radyal kuvvet (F_r) arasında alışılmışın dışında bir eğilim meydana gelmiştir. Şekil 7.7'deki grafiklerden görülebileceği gibi %5 SiC kodlu numunenin işlenmesi sonucunda, hem kesme parametreleri hem de kesici takım malzemelerinin tamamında, F_r değerleri F_f değerlerinden çok az farkla daha büyük olmuştur. Bu durumun, kesici takım yanaşma açısının 75° ve etkin talaş açısının negatif ($\gamma=-6^\circ$) ve kesici uç yarıçapının büyük olması nedeniyle meydana gelen talaş oluşumunun bir sonucu olduğu düşünülmektedir. Ayrıca, talaş açısının negatif olması, özellikle düşük kesme hızlarında SK ve KBN kesici takımlarla yapılan kesme işlemlerinde kesici takım burun bölgesinde YT katmanının oluşmasına neden olmuştur (Resim 7.11a ve Resim 7.12a).

75 m/min kesme hızı ve 0,1 mm/rev ilerlemede SK ve KBN kesici takımlarda meydana gelen YT katmanın, genellikle burun bölgesinde olduğu görülmektedir. KBN kesicide YT katmanı yüksekliğinin daha küçük olduğu tespit edilmiş olup bu durumun talaş kökü incelemeleri neticesinde, KBN kesici takımın daha düşük sürtünme katsayısına sahip olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir (Resim 7.11a ve Resim 7.12a). SK kesici ile işleme esnasında oluşan 24° 'lik kayma düzlemi açısının (Resim 7.13a), bu sonucu desteklemekle birlikte kesici takım geometrisini değiştirdiği tespit edilmiştir.



Resim 7.11. %5 SiC kodlu numunenin SK ile işlenmesinde oluşan SEM görüntüleri
a) $V=75$ m/min, $f=0,1$ mm/rev, b) $V=300$ m/min, $f=0,1$ mm/rev



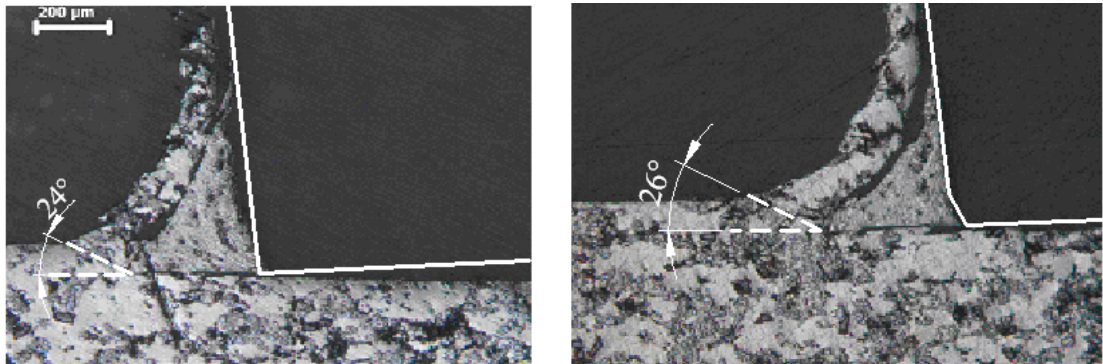
a)

b)

Resim 7.12. %5 SiC kodlu numunenin KBN ile işlenmesinde oluşan SEM görüntüleri

a) $V=75$ m/min, $f=0,1$ mm/rev, b) $V=300$ m/min, $f=0,1$ mm/rev

Özellikle SK kesicinin burun bölgesinde oluşan sabit YT katmanın, takım-talaş temas uzunluğunu artmasına neden olarak [144] kesme kuvvetlerini artırdığı düşünülmektedir. Ayrıca, her iki kesici takımında düşük kesme hızında oluşan YT, kesici takım uç radiusunu artırmış ve kesici takımın birinci deformasyon bölgesinde kazıma şeklinde talaş oluşturmaya [47] neden olmuştur. Sonuç olarak artan uç radiusunun, kesme sırasında işparçası deformasyonunu zorlaştıracığı ve kısmen de olsa kesici takımın kesme kenar uzunluğunun artması neticesinde takımın alın yüzeyinde oluşan basma kuvvetlerini artıracığı ve böylece radyal yönde meydana gelen kesme kuvvetlerini artırdığı düşünülmektedir.



a)

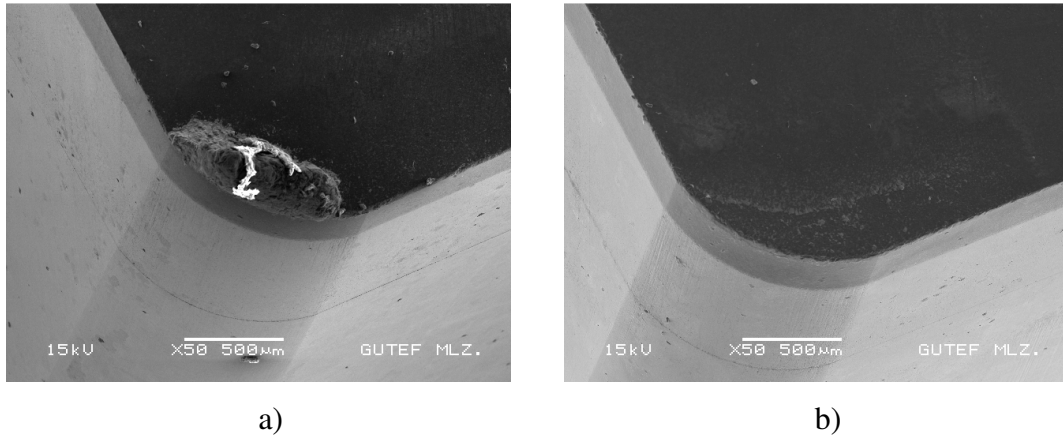
b)

Resim 7.13. %5 SiC kodlu numunede 0,1 mm/rev ilerleme ve 75 m/min kesme hızında oluşan talaş kökü

a) SK kesici takım, b) KBN kesici takım

Kesme hızının artmasıyla birlikte KBN kesicide YT katmanı azalırken, SK kesicide oluşan YT katmanının yüksekliğinin biraz daha azaldığı, ancak bu kesicide YT'ın yardımcı kesici kenara doğru yayıldığı görülmüştür (Resim 7.11b ve Resim 7.12b). SK kesicide meydana gelen bu durumun, %5 SiC kodlu numunenin yüksek hızda (300 m/min) işlenmesi sonrasında kesicide oluşan aşınma ve böylece kısmen de olsa kesici takımın sürtünme katsayısının artması sonucu olduğu düşünülmektedir. SK kesici takımın burun bölgesinde meydana gelen aşınmaya bağlı olarak takım-talaş ara yüzeyi sürtünmesi artacak ve böylece YT katmanı kalıcı bir hal alarak kesici takım gibi davranmaya başlayacaktır.

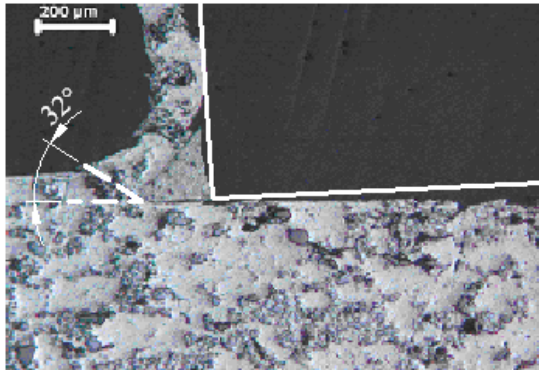
Resim 7.14'de %5 SiC kodlu numunenin ÇKE kesici takımla işlenmesi sonrasında kesici takımlardan çekilen SEM görüntüleri verilmiştir.



Resim 7.14. %5 SiC kodlu numunenin ÇKE ile işlenmesinde oluşan SEM görüntüleri
a) $V=75$ m/min, $f=0,1$ mm/rev, b) $V=300$ m/min, $f=0,1$ mm/rev

% 5 SiC kodlu numunenin 0,1 mm/rev ilerleme miktarı ve 75 m/min kesme hızıyla ÇKE kesici takımla işlenmesinde takımın burnunda çok az da olsa YT katmanının oluştuğu görülmektedir (Resim 7.14). Düşük kesme hızında birinci deformasyon bölgesinde oluşan ısının düşük olması, işparçasındaki ısıl yumuşamayı azaltacağı ve bunun sonucunda ikinci deformasyon bölgesinde talaş sürtünmesinin artmasına neden olacağı düşünülmektedir. Aynı zamanda mikroyapıdaki gözeneklilik kesme

işlemi sırasında kesintili kesme sürecini başlatarak birinci deformasyon bölgesindeki ısı miktarının düşmesine sebep olacaktır. Kesme işlemi boyunca meydana gelen her iki durumun etkisiyle, ÇKE kesici takımın sürtünme katsayısı SK ve KBN kesici takımlara göre daha düşük olmasına rağmen, YT oluşumuna sebep olduğu düşünülmektedir. ÇKE kesici takımda 0,1 mm/rev ve 75 m/min kesme hızında talaş kökü incelemelerinde sonucunda küçük de olsa YT katmanının oluşumu gözlenmiştir (Resim 7.15). Diğer kesici takımlara göre daha büyük kayma düzlemi açısı (32°) tespit edilmiş olup bu durum kesici takım sürtünme katsayısına atfedilmektedir. Kesme hızının 300 m/min'e çıkarılmasıyla kesici takımda herhangi bir YT oluşumu gerçekleşmemiştir. Bu durum, kesme hızının artmasıyla takım-talaş ara yüzeyindeki sıcaklığın artmasına bağlı olarak matris malzemesinin yumuşamasıyla birlikte oluşan hızlı talaş akışıyla açıklanabilir.



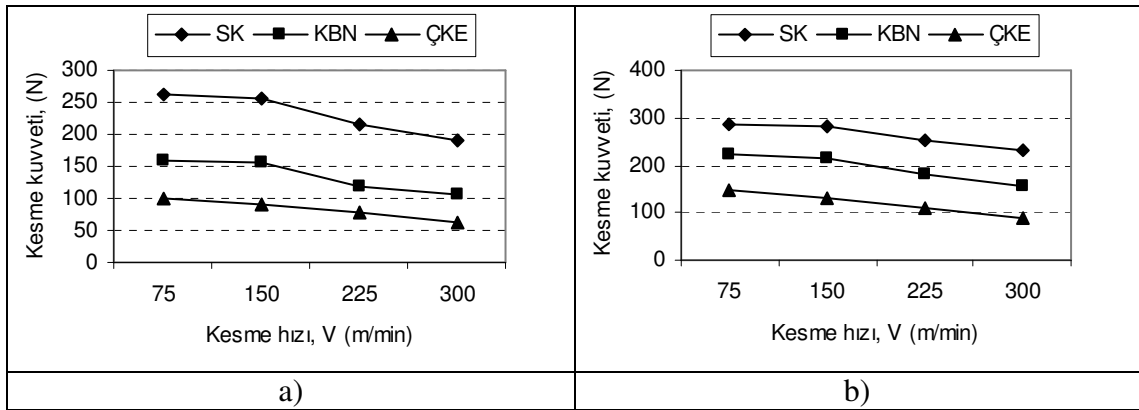
Resim 7.15. %5 SiC kodlu numunenin ÇKE ile işlenmesinde oluşan talaş kökü fotoğrafı

%5 SiC kodlu numune için ölçülen kesme kuvveti bileşenlerinin, kesici takım malzemelerinin hepsinde büyükten küçüğe doğru F_c , F_r ve F_f şeklinde meydana geldiği görülmektedir (Şekil 7.7). En yüksek kesme kuvvetleri SK kesici takımla 0,2 mm/rev ilerleme ve 75 m/min kesme hızında $F_c=257,87$ N, $F_r=196,02$ N, $F_f=188,17$ N şeklinde oluşurken; en düşük kesme kuvvetleri, ÇKE kesici takımla 0,1 mm/rev ilerleme ve 300 m/min kesme hızında yapılan kesme işlemi sonucunda $F_c=57,02$ N, $F_r=24,8$ N ve $F_f=21,4$ N olarak ölçülmüştür. Kesme hızı ve ilerlemenin en düşük olduğu kesme şartında ($f=0,1$ mm/rev, $V=75$ m/min), SK kesici takımla yapılan kesme işlemi sonucunda F_r/F_f oranı %13 iken, bu oran KBN'de %5, ÇKE'de %10

olarak hesaplanmıştır. Kesme hızının 300 m/min'e artırılmasıyla bu oranlama; SK'de %2, KBN'de %17, ÇKE'de %16 şeklinde gerçekleşmiştir. İlerleme miktarının iki katına çıkmasıyla Fr/Ff oranı, 75 m/min kesme hızında SK'de %4, KBN'de %15, ÇKE'de %11; 300 m/min kesme hızında SK'de %22, KBN'de %32, ÇKE'de %17 şeklinde olmuştur.

%10 SiC kodlu numunenin işlenebilirliğinin değerlendirilmesi

%10 SiC kodlu numune için kesme hızı ve ilerleme miktarına göre oluşan esas kesme kuvvetinin değişimi kesici takım malzemeleri açısından Şekil 7.8'de verilmiştir.



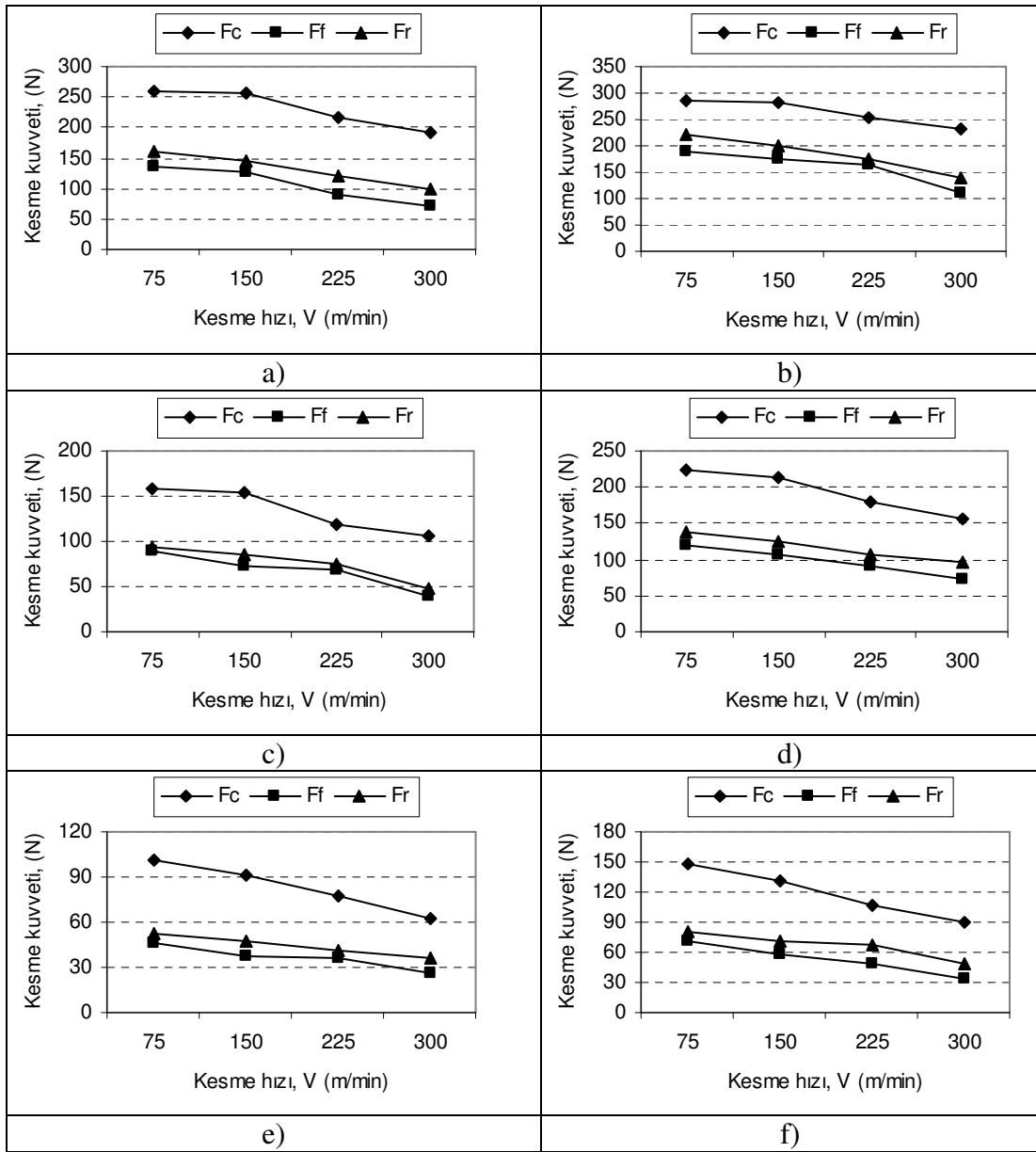
Şekil 7.8. %10 SiC kodlu numune için kesme hızına göre F_c değişimi

a) $f=0,1$ mm/rev, b) $f=0,2$ mm/rev

%10 SiC kodlu numunenin SK ve KBN kesicilerle işlenmesi sırasında, her iki ilerleme değeri için de kesme hızının 75 m/min'den 150 m/min'e artırılmasıyla ölçülen F_c değerlerinde kayda değer bir azalma olmazken, ÇKE kesici takımla ölçülen F_c değerlerinde doğrusal bir azalma görülmektedir (Şekil 7.8). 150 m/min'den sonraki kesme hızı değerlerinde kesici takım malzemelerinin tamamı için F_c 'nin azalma eğiliminde olduğu görülmektedir. F_c 'deki bu azalmanın nedeni olarak, kesme hızının artmasıyla birinci deformasyon bölgesinde meydana gelen ısı miktarının artmasına bağlı oluşan talaş oluşumu gösterilebilir.

%10 SiC kodlu numunenin işlenmesinde oluşan Fc değerlerinin %5 SiC'e göre daha yüksek olmasının birinci nedeni, bu numune dayanımının %5 SiC'e göre %20 daha fazla olmasıdır. İkinci neden olarak, 172 MPa'lık bir çapraz kırılma mukavemeti ile de üretilen kompozit numuneler arasındaki en tok malzeme olması gösterilebilir. İlerleme miktarının artmasıyla beraber talaş kesiti de artmış ve dolayısıyla Fc değerleri artış eğilimi göstermiştir. %10 SiC kodlu kompozit malzemenin SK kesici takım ile 75 m/min kesme hızı ve 0,2 mm/rev ilerleme miktarında işlenmesinde en yüksek Fc değerine (287,2 N) ulaşılmıştır. En düşük Fc değeri (62,6 N) ise ÇKE kesici takım malzemesiyle 300 m/min kesme hızı ve 0,1 mm/rev ilerleme miktarında işlenmesiyle ortaya çıkmıştır. %10 SiC kodlu numunede oluşan Fc kuvvetleri, kesici takım malzemeleri açısından değerlendirilecek olursa; 0,1 mm/rev ilerleme ve 75 m/min kesme hızı için Fc değerlerinde, SK'ye göre KBN kesicide %39, ÇKE kesicide %61'lik bir azalma hesaplanmıştır. Aynı ilerleme miktarı için Fc değerinde, kesme hızının 300 m/min'e çıkarılmasıyla KBN kesicide %44, ÇKE kesicide %67'lik bir azalma meydana gelmiştir. İlerleme miktarının 0,2 mm/rev'e çıkarılmasıyla beraber Fc'ye bağlı bu oranlama; 75 m/min kesme hızı için KBN kesicide %22, ÇKE kesicide %48 olurken, 300 m/min kesme hızı için KBN kesicide %32, ÇKE kesicide %60 şeklinde hesaplanmıştır. İlerlemedeki artışla birlikte KBN ve ÇKE kesici takımlar için kesme hızının artmasıyla Fc değerlerindeki bu düzenli azalma eğiliminin, diğer kompozit numunelere göre daha homojen yapı neticesinde ortaya çıkan yüksek çapraz kırılma dayanımı ve sertliğinin bir sonucu olduğu düşünülmektedir.

Şekil 7.9'da, %10 SiC kodlu numunenin SK, KBN ve ÇKE kesici takım malzemeleriyle iki farklı ilerleme miktarı ve dört farklı kesme hızıyla işlenmesinde oluşan kesme kuvveti bileşenlerinin değişimleri grafikler halinde verilmiştir.



Şekil 7.9. %10 SiC kodlu numune için kesici takım malzemelerine göre kesme kuvvetlerinin değişimi

a) SK kesici, $f=0,1$ mm/rev, b) SK kesici, $f=0,2$ mm/rev

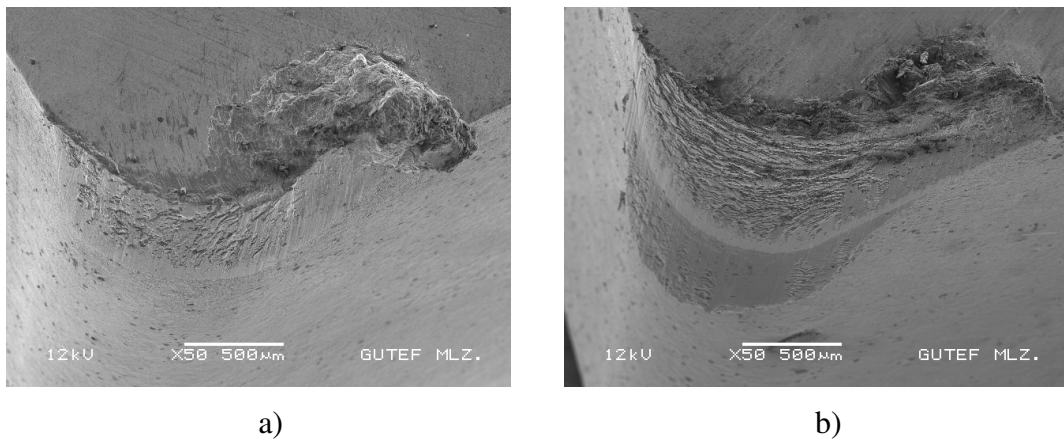
c) KBN kesici, $f=0,1$ mm/rev, d) KBN kesici, $f=0,2$ mm/rev

e) ÇKE kesici, $f=0,1$ mm/rev, f) ÇKE kesici, $f=0,2$ mm/rev

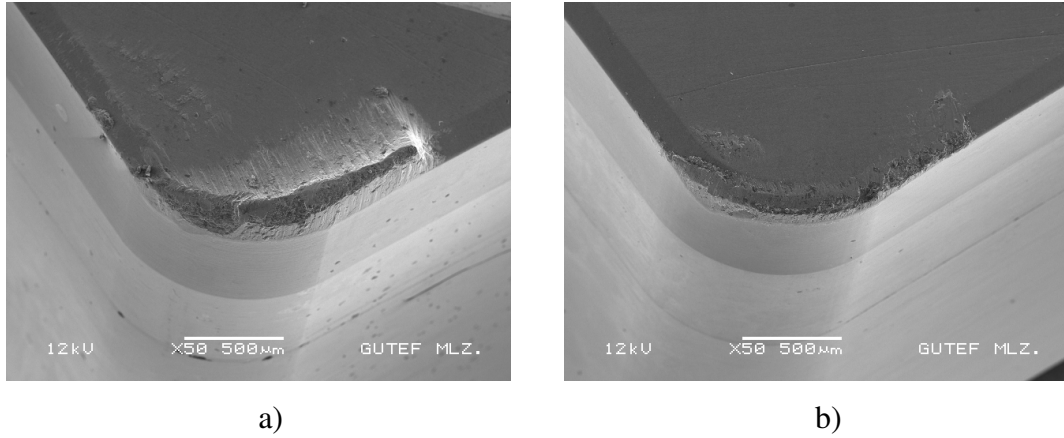
%10 SiC kodlu numunenin üç farklı kesici takımla işlenmesi sırasında kesme hızının artırılmasıyla kesme kuvveti bileşenlerinin tümünde (Fc, Ff ve Fr) bir azalma eğilimi görülmektedir (Şekil 7.9). İlerleme miktarının 0,1 mm/rev'den 0,2 mm/rev'e çıkmasıyla artan talaş kesiti neticesinde kesme kuvveti değerlerinin de arttığı tespit edilmiştir.

Kesme parametrelerinin hepsi için, SK ile yapılan ve kesme hızının 75 m/min'den 150 m/min'e çıktığı kesme deneyi hariç, bütün kesici takımlarda kesme hızının artmasıyla F_c 'nin azaldığı görülmektedir. Kesme şartlarının tamamında F_c en büyük kuvvet olarak ölçülürken, ilerleme kuvveti (F_f) ile radyal kuvvet (F_r) birbirine çok yakın değerlerde meydana gelmiştir (Şekil 7.9). %10 SiC kodlu numunenin işlenmesi sonucunda, F_r değerleri ile F_f değerleri arasındaki en büyük fark ~32 N olarak ölçülmüştür. Kesme kuvvetlerinde oluşan bu durum, talaş oluşumunda gerekli olan gücün tamamına yakınının F_c için harcandığı görüşünün [126] çok genel bir tespit olduğunu göstermektedir. Alumix 231 ve %5 SiC kodlu numuneler için de benzer durumun oluşmasına dayanarak, kesme sırasında harcanan enerjinin kesme kuvvetleri üzerindeki dağılımının kesici takım geometrisine bağlı olarak (etkin talaş açısı ve kesici uç yarıçapı) değişebileceğinin bir kanıtıdır.

Özellikle düşük kesme hızında (75 m/min) SK kesici takımla yapılan kesme işlemlerinde takım kesici kenarı ve burun bölgesinde YT katmanının oluştuğu tespit edilmiştir (Resim 7.16a). KBN kesici takımdaki YT katmanının, SK'ya oranla daha az miktarda kesici takımın aynı bölgesinde oluştuğu görülmektedir (Resim 7.17a). Her iki kesici takımda da oluşan bu durumun, kesici takım uç yarıçapını artırarak, çoğunlukla takımdaki 75°'lik yanaşma açısından kaynaklanan F_r 'nin F_f 'den yüksek oluşması [124] sonucuna katkı sağladığı düşünülmektedir.



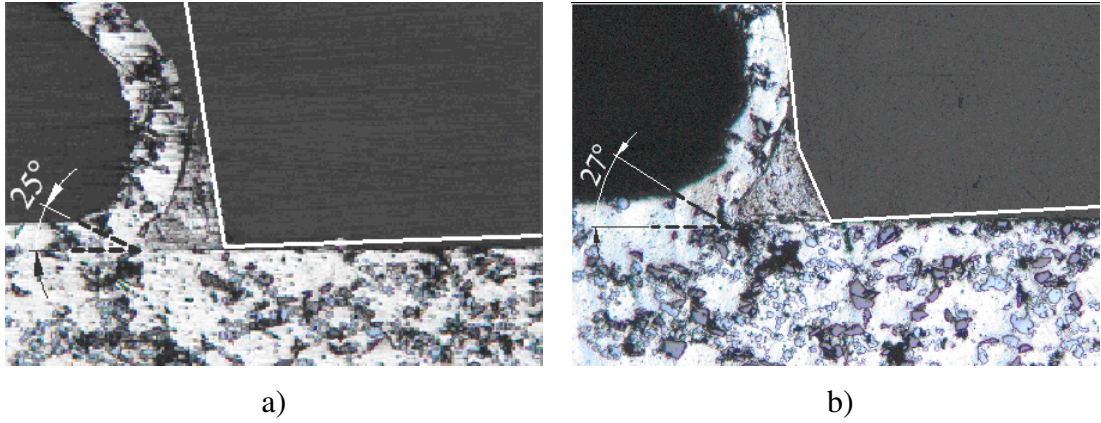
Resim 7.16. %10 SiC kodlu numunenin SK ile işlenmesinde oluşan SEM görüntüleri
a) $V=75$ m/min, $f=0,1$ mm/rev, b) $V=300$ m/min, $f=0,1$ mm/rev



Resim 7.17. %10 SiC kodlu numunenin KBN ile işlenmesinde oluşan SEM görüntüleri

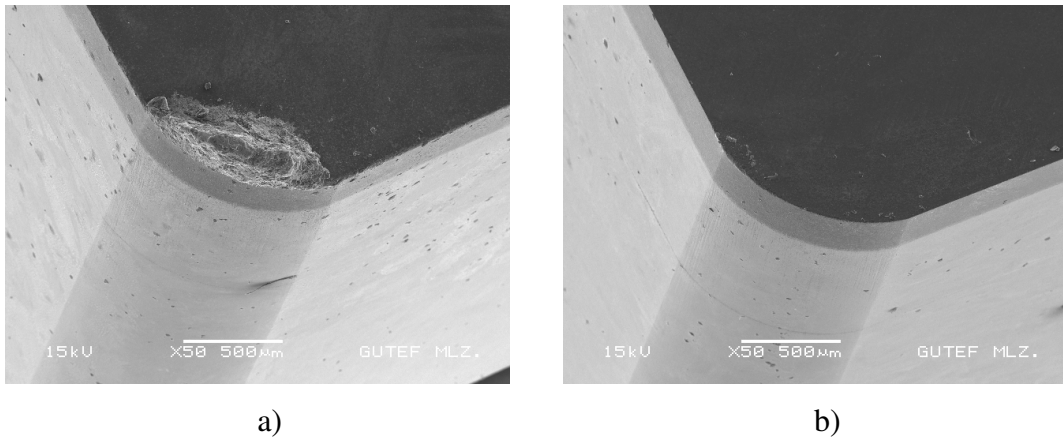
a) $V=75$ m/min, $f=0,1$ mm/rev, b) $V=300$ m/min, $f=0,1$ mm/rev

75 m/min kesme hızı ve 0,1 mm/rev ilerleme miktarında SK ile yapılan kesme işlemi sonunda takımın burun bölgesinde aşınmaya maruz kalması sonucunda muhtemelen takımın aşınan bölgesinde sürtünme katsayısının arttığı ve bu oluşumun YT katmanını yüksekliğini artırdığı düşünülmektedir. Kesme hızının 300 m/min'e çıkmasıyla birlikte kesici takıma hızla çarpan SiC ve Si fazları kesici takımdaki aşınmayı artırmıştır. Bu durum, kesici takım sürtünme katsayısının artmasına sebep olarak YT katmanının yardımcı kesici kenara doğru yayılmasına yol açmıştır (Resim 7.16b). SK'ün aksine KBN kesici takımlarda, kesme hızının artmasıyla YT katmanının büyük oranda azaldığı görülmektedir (Resim 7.17b). Bu durum, KBN kesiciyle işlemede oluşan 27°'lik kayma düzlemi açısı ve kısmen de olsa takımın daha düşük sürtünme katsayısına sahip olmasına atfedilebilir. Özellikle SK kesicinin burun bölgesinde oluşan YT katmanı, kesici takımın geometrisini değiştirerek takım-talaş temas uzunluğunun artmasına ve ikinci deformasyon bölgesinde takımın, talaşlardan kaynaklanan ilave basınca maruz kalması [124, 144] sonucunda kesme kuvvetlerinin yükselmesine neden olmuştur (Resim 7.18a). Ayrıca, SK kesici takımda meydana gelen 25°'lik kayma düzlemi açısının bu oluşumu desteklediği düşünülmektedir.



Resim 7.18. %10 SiC kodlu numunede 0,1 mm/rev ilerleme ve 75 m/min kesme hızında oluşan talaş kökü
a) SK kesici takım, b) KBN kesici takım

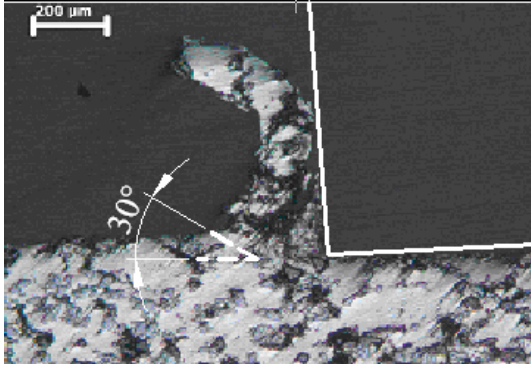
Resim 7.19'da %10 SiC kodlu numunenin ÇKE kesici takımla işlenmesi sonrasında kesici takımlardan çekilen SEM görüntüleri verilmiştir.



Resim 7.19. %10 SiC kodlu numunenin ÇKE ile işlenmesinde oluşan SEM görüntüleri
a) V=75 m/min, f=0,1 mm/rev, b) V=300 m/min, f=0,1 mm/rev

% 10 SiC kodlu numunenin 0,1 mm/rev ilerleme miktarı ve 75 m/min kesme hızıyla ÇKE kesici takımla işlenmesinde takımın burnunda çok az da olsa YT katmanının oluştuğu görülmektedir (Resim 7.19a). Bu durum, düşük kesme hızında kesme işlemi sırasında ikinci deformasyon bölgesindeki sürtünmenin artmasıyla açıklanabilir. ÇKE kesici takımda YT katmanının oluşumu gözlense de, kesici takımın düşük sürtünme katsayısı ve numune sertliğinin yüksek olması neticesinde kısa formda

talaşlar meydana gelmiştir (Resim 7.20). Bu durumun, takım-talaş temas uzunluğunun artışı engelleyerek kesme kuvvetlerinin yükselmesini engellediği düşünülmektedir. Kesme hızının 300 m/min'e çıkarılmasıyla kesici takımda herhangi bir YT oluşumu meydana gelmemiştir (Resim 7.19b).

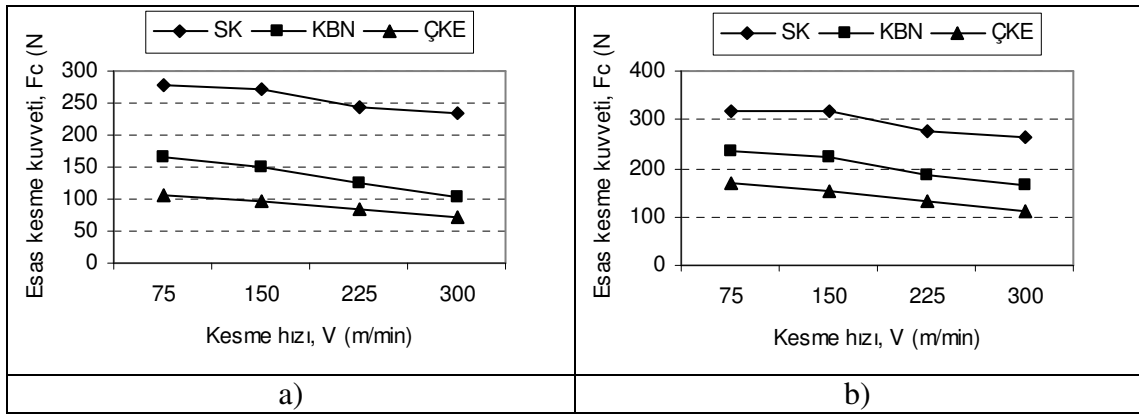


Resim 7.20. %10 SiC kodlu numunenin ÇKE ile işlenmesinde oluşan talaş kökü fotoğrafı

Kesici takım malzemelerinin hepsinde kesme kuvveti bileşenlerinin büyükten küçüğe doğru F_c , F_r ve F_f şeklinde meydana geldiği görülmektedir (Şekil 7.9). En yüksek kesme kuvvetleri SK kesici takımla 0,2 mm/rev ilerleme ve 75 m/min kesme hızında $F_c=287,2$ N, $F_r=220,13$ N, $F_f=190,47$ N şeklinde oluşurken; en düşük kesme kuvvetleri, ÇKE kesici takımla 0,1 mm/rev ilerleme ve 300 m/min kesme hızında yapılan kesme işlemi sonucunda $F_c=62,6$ N, $F_r=36$ N ve $F_f=26,03$ N olarak ölçülmüştür. Kesme hızı ve ilerlemenin en düşük olduğu kesme şartında ($f=0,1$ mm/rev, $V=75$ m/min), SK kesici takımla yapılan kesme işlemi sonucunda F_r/F_f oranı %18 iken, bu oran KBN'de %5, ÇKE'de %13 olarak hesaplanmıştır. Kesme hızının 300 m/min'e artırılmasıyla bu oranlama; SK'de %37, KBN'de %19, ÇKE'de %38 şeklinde gerçekleşmiştir. İlerleme miktarının iki katına çıkmasıyla F_r/F_f oranı, 75 m/min kesme hızında SK'de %15, KBN'de %16, ÇKE'da %13; 300 m/min kesme hızında SK'de %22, KBN'de %34, ÇKE'da %45 şeklinde olmuştur.

%15 SiC kodlu numunenin işlenebilirliğinde kesme kuvvetlerinin değerlendirilmesi

%15 SiC kodlu numune için kesme hızı ve ilerleme miktarına göre oluşan esas kesme kuvvetinin değişimi kesici takım malzemeleri açısından Şekil 7.10'da verilmiştir.



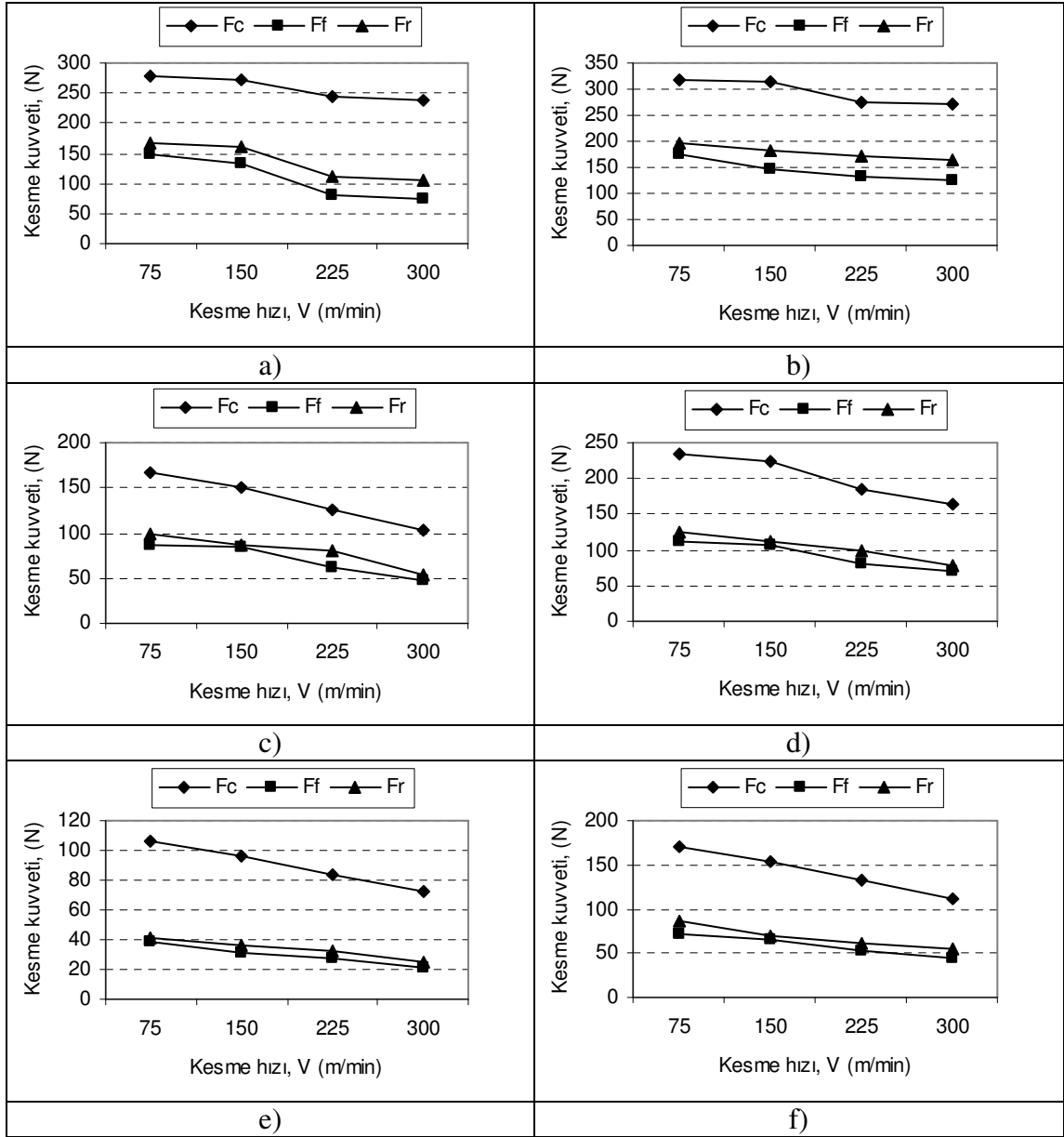
Şekil 7.10. %15 SiC kodlu numune için kesme hızına göre Fc değişimi
a) f= 0,1 mm/rev, b) f= 0,2 mm/rev

%15 SiC kodlu numunenin işlenmesi sırasında oluşan Fc'nin değişimi, SK kesici takım hariç diğer takım malzemeleri için 150 m/min'den sonraki kesme hızı değerlerinde azalma eğilimindedir (Şekil 7.10). SK kesici takımda, kesme hızının 150 m/min'den 225 m/min'e artmasıyla Fc'de azalma olurken, kesme hızı 300 m/min'e çıktığında Fc'nin tekrar artma eğilimine girdiği gözlenmiştir. Bu durumun, SK kesicinin yüksek kesme hızında burun bölgesinde oluşan aşınmanın bir sonucu olduğu düşünülmektedir.

Şekil 7.10 incelendiğinde, %15 SiC kodlu numunenin işlenmesinde oluşan Fc değerlerinin diğer numunelerde ölçülen kesme kuvvetlerine göre daha yüksek değerlerde ölçüldüğü görülmektedir. %15 SiC kodlu numune içerisindeki SiC takviye oranının artmasıyla birlikte artan sertliğin bu sonuca neden olduğu düşünülmektedir. İlerleme miktarının artmasıyla beraber talaş kesiti de artmış ve dolayısıyla Fc değerleri artış eğilimi göstermiştir. En yüksek Fc değeri (317,21 N), SK kesici takımla 75 m/min kesme hızı ve 0,2 mm/rev ilerleme miktarında yapılan

deneyde ölçülmüştür. En düşük F_c değeri (72,5 N) ise ÇKE kesici takım malzemesiyle 300 m/min kesme hızı ve 0,1 mm/rev ilerleme miktarında işleme sonucunda oluşmuştur. %15 SiC kodlu numunede oluşan F_c kuvvetleri, kesici takım malzemeleri açısından değerlendirilecek olursa; 0,1 mm/rev ilerleme ve 75 m/min kesme hızı için F_c değerlerinde, SK'ye göre KBN kesicide %40, ÇKE kesicide %62'lik bir azalma hesaplanmıştır. Aynı ilerleme miktarı için F_c değerinde, kesme hızının 300 m/min'e çıkarılmasıyla KBN kesicide %56, ÇKE kesicide %69'luk bir azalma meydana gelmiştir. İlerleme miktarının 0,2 mm/rev'e çıkarılmasıyla beraber F_c 'ye bağlı bu oranlama; 75 m/min kesme hızı için KBN kesicide %26, ÇKE kesicide %46 olurken, 300 m/min kesme hızı için KBN kesicide %39, ÇKE kesicide %58 şeklinde hesaplanmıştır. İlerleme miktarının ve kesme hızının artmasıyla birlikte KBN ve ÇKE'de oluşan F_c değerlerindeki azalma eğilimi, bu kesici takım malzemelerinin SK'ye göre sürtünme katsayısının daha düşük ve daha sert olmalarının bir sonucudur.

Şekil 7.11'de %15 SiC kodlu numunenin SK, KBN ve ÇKE kesici takım malzemeleriyle iki farklı ilerleme miktarı ve dört farklı kesme hızıyla işlenmesinde oluşan kesme kuvveti bileşenlerinin değişimleri grafikler halinde verilmiştir.



Şekil 7.11. %15 SiC kodlu numune için kesici takım malzemelerine göre kesme kuvvetlerinin değişimi

a) SK kesici, $f = 0,1$ mm/rev, b) SK kesici, $f = 0,2$ mm/rev

c) KBN kesici, $f = 0,1$ mm/rev, d) KBN kesici, $f = 0,2$ mm/rev

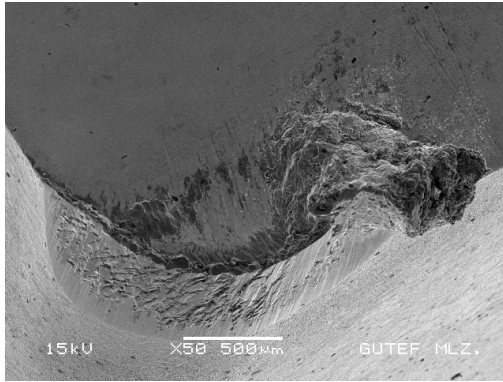
e) ÇKE kesici, $f = 0,1$ mm/rev, f) ÇKE kesici, $f = 0,2$ mm/rev

%15 SiC numunenin işlenmesinde, kesme kuvveti bileşenlerinin tümünde (Fc, Ff ve Fr) kesme hızının artırılmasıyla meydana gelen azalma eğiliminin, SK kesici takımda çok az olduğu görülmektedir (Şekil 7.11). Özellikle düşük kesme hızında (kesme hızı 75 m/min'den 150 m/min'e çıkarıldığında), SK'de 0,1 mm/rev için Fc kuvvetindeki

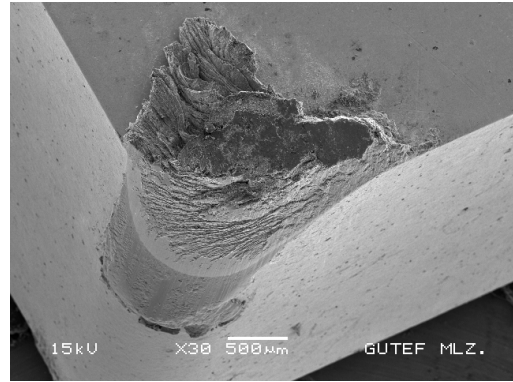
azalma %1,7 olurken, 0,2 mm/rev için %0,5 olarak gerçekleşmiştir. İlerleme miktarının 0,1 mm/rev'den 0,2 mm/rev'e çıkmasıyla birlikte artan talaş kesitine bağlı olarak, bütün kesici takım malzemeleri için kesme kuvveti değerleri artmıştır.

SK ile yapılan kesme işleminde, her iki ilerleme miktarı için kesme hızının 150 m/min'den 225 m/min'e çıkmasıyla kesme kuvvetlerinde azalma olurken, kesme hızının 300 m/min'e çıkmasıyla bu eğilim azalmıştır (Şekil 7.11b). Kesme şartlarının tamamında F_c en büyük kuvvet olarak ölçülürken, ilerleme kuvveti (F_f) ile radyal kuvvet (F_r) birbirine çok yakın değerlerde meydana gelmiştir (Şekil 7.11). F_r değerleri ile F_f değerleri arasındaki en büyük fark ~39N olarak, SK kesiciyle 0,2 mm/rev ilerleme ve 225 m/min kesme hızında yapılan işleme sonucunda oluşmuştur. %15 SiC kodlu numune diğer numunelere göre daha gözenekli bir yapıda olsa da, içerisindeki SiC parçacık miktarının fazla olması ve Si fazlarının iriliği kesme kuvveti bileşenlerinin yüksek ölçülmesinin temel nedeni olarak gösterilebilir.

Özellikle düşük kesme hızında (75 m/min) SK kesici takımla yapılan kesme işlemlerinde takım kesici kenarı ve burun bölgesinde daha fazla YT katmanının oluştuğu tespit edilmiştir (Resim 7.21a). Bu durumun, düşük kesme hızında kesme bölgesinde oluşan sıcaklığın düşmesi ve numune içerisindeki gözeneklerin kesme işleminin kesintili olarak gerçekleşmesine neden olarak birinci deformasyon bölgesindeki ısı miktarının azalmasına katkı sağlaması sonucu oluştuğu düşünülmektedir. KBN kesici takımdaki YT katmanının, SK'e oranla daha az miktarda, kesici takımın aynı bölgesinde oluştuğu görülmektedir (Resim 7.22a). Her iki kesici takımda da oluşan bu durumun, takım-talaş temas uzunluğunu artırarak sürtünme kuvvetlerinin artmasına ve böylece özellikle F_r 'nin F_f 'den yüksek oluşmasına neden olduğu düşünülmektedir.

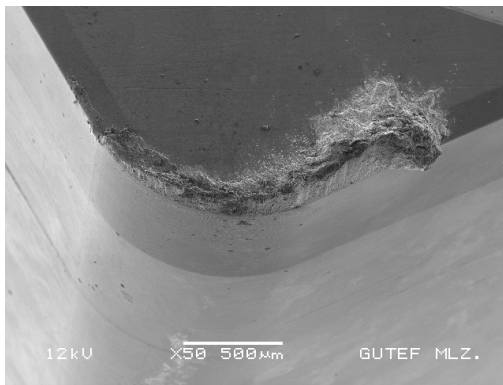


a)

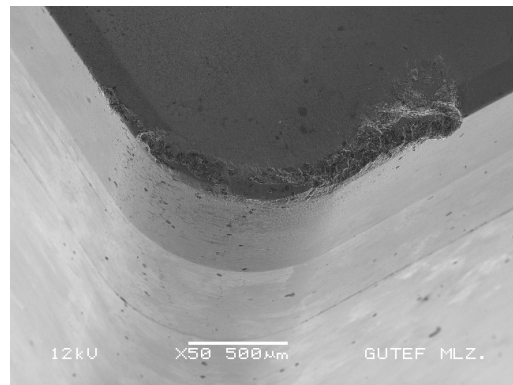


b)

Resim 7.21. %15 SiC kodlu numunenin SK ile işlenmesinde oluşan SEM görüntüleri
a) $V=75$ m/min, $f=0,1$ mm/rev, b) $V=300$ m/min, $f=0,1$ mm/rev



a)

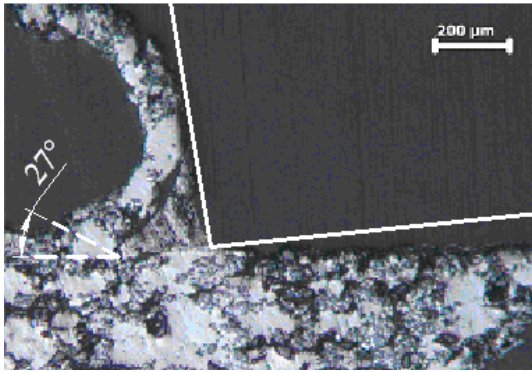


b)

Resim 7.22. %15 SiC kodlu numunenin KBN ile işlenmesinde oluşan SEM görüntüleri
a) $V=75$ m/min, $f=0,1$ mm/rev, b) $V=300$ m/min, $f=0,1$ mm/rev

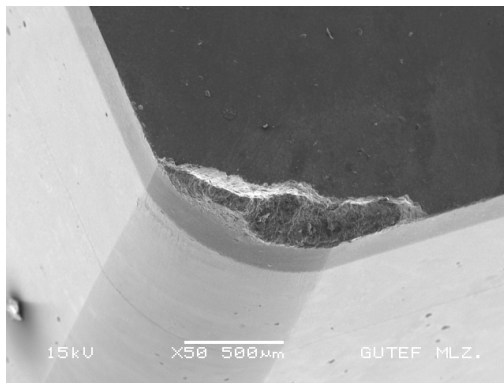
Resim 7.21a'dan, 75 m/min kesme hızı ve 0,1 mm/rev ilerlemede SK ile yapılan kesme işlemi sonunda takımın burun bölgesinin aşınmaya maruz kalması sonucunda YT katmanı yüksekliğinin arttığı söylenebilir. Kesme hızının 300 m/min'e çıkmasıyla birlikte kesicinin burun bölgesindeki aşınmanın büyüdüğü görülmektedir (Resim 7.21b). SK'deki bu oluşum, kesme işleminin gözenekli mikroyapı nedeniyle kesikli kesme gibi oluşması ve numune içerisindeki sert fazların (SiC parçacık ve Si fazı) zamanla kesici takımın darbe direncini azaltmasına atfedilebilir [132]. Bu durumda, kesici takım burun bölgesindeki aşınmanın yardımcı kesici kenara doğru kayarak, YT'ın yardımcı kesici kenarda sabitlenmesi ve bunun sonucunda üçüncü deformasyon bölgesindeki deformasyon miktarının artmasından söz edilebilir. Resim

7.23'deki talaş kökü fotoğrafından görülebileceği gibi, SK kesicideki YT kalıcı olup takım-talaş temas uzunluğunu artırarak kesme kuvvetlerinin yükselmesine neden olmuştur. Bununla birlikte, YT kesici takımın uç radiusunu artırdığından dolayı takım ucunun batmasını zorlaştırmış ve buna bağlı olarak radyal yönde oluşan kuvvetlerin F_f 'den yüksek oluşmasına neden olduğu düşünülmektedir. SK'nın aksine KBN kesici takımlarda, kesme hızının artmasıyla YT katmanının büyük oranda azaldığı görülmektedir (Resim 7.22b).

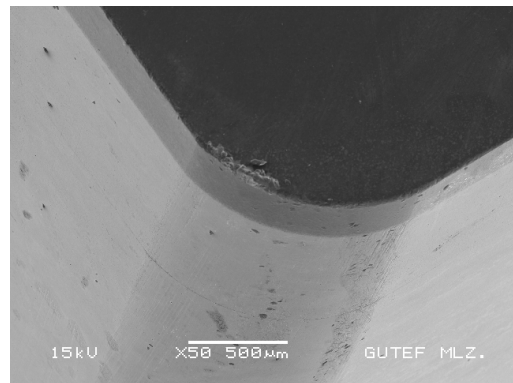


Resim 7.23. %15 SiC kodlu numunenin SK ile işlenmesinde oluşan talaş kökü fotoğrafı

Resim 7.24'de %15 SiC kodlu numunenin ÇKE kesici takımla işlenmesi sonrasında kesici takımlardan çekilen SEM görüntüleri verilmiştir.



a)

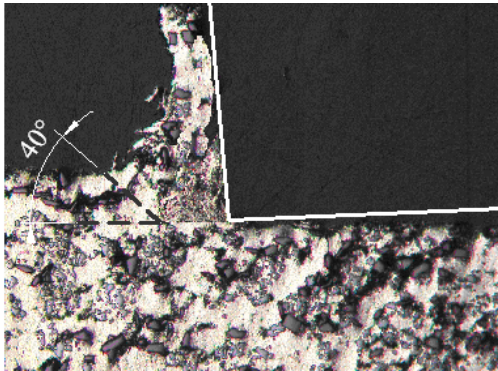


b)

Resim 7.24. %15 SiC kodlu numunenin ÇKE ile işlenmesinde oluşan SEM görüntüleri

a) $V=75$ m/min, $f=0,1$ mm/rev, b) $V=300$ m/min, $f=0,1$ mm/rev

% 15 SiC kodlu numunenin 0,1 mm/rev ilerleme miktarı ve 75 m/min kesme hızıyla ÇKE kesici takımla işlenmesinde takımın burnunda az da olsa YT katmanının oluştuğu görülmektedir (Resim 7.24a). Aynı kesme şartları için %10 SiC kodlu numune ile karşılaştırıldığında YT katmanının biraz daha fazla oluştuğu görülmektedir. Bu oluşumun nedeni olarak, %15 SiC kodlu numunedeki gözenekliliğin %10 SiC kodlu numuneye göre fazla olması gösterilebilir. Gözenekliliğin artması, muhtemelen düşük kesme hızında kesme işlemi sırasında meydana gelen sıcaklığın sabit bir değerde kalmasını engelleyerek ikinci deformasyon bölgesindeki sürtünmenin artmasına neden olacaktır. Böylece, numune sertliği yüksek olsa da, gözenek yoğunluğunun fazla olması, ÇKE kesici takımla 75 m/min kesme hızında işlemede az da olsa YT katmanının oluşmasına sebep olduğu düşünülmektedir. Bununla birlikte, numunedeki gözeneklilik ve sert faz yoğunluğunun sonucu meydana gelen 40°'lik kayma düzlemi açısı neticesinde oluşan talaşlar kısa ve homojen olmayan formlarda meydana gelmiştir (Resim 7.25). Bu süreç, takım-talaş temas uzunluğunun kısalmasını sağlayarak kesme kuvvetlerinin yükselmesini engellemiştir. Kesme hızının 300 m/min'e çıkarılmasıyla kesici takımda herhangi bir YT oluşumu meydana gelmemiştir (Resim 7.24b).



Resim 7.25. %15 SiC kodlu numunenin ÇKE ile işlenmesinde oluşan talaş kökü fotoğrafı

Kesici takım malzemelerinin hepsinde kesme kuvveti bileşenlerinin büyükten küçüğe doğru F_c , F_r ve F_f şeklinde meydana geldiği görülmektedir (Şekil 7.11). En yüksek kesme kuvvetleri SK kesici takımla 0,2 mm/rev ilerleme ve 75 m/min kesme hızında $F_c=317,21$ N, $F_r=197,4$ N, $F_f=176,74$ N şeklinde oluşurken; en düşük kesme

kuvvetleri, ÇKE kesici takımla 0,1 mm/rev ilerleme ve 300 m/min kesme hızında yapılan kesme işlemi sonucunda $F_c=72,5$ N, $F_r=24,71$ N ve $F_f=21,72$ N olarak ölçülmüştür. Kesme hızı ve ilerlemenin en düşük olduğu kesme şartında ($f=0,1$ mm/rev, $V=75$ m/min), SK kesici takımla yapılan kesme işlemi sonucunda F_r/F_f oranı %10 iken, bu oran KBN’de %13, ÇKE’de %7 olarak hesaplanmıştır. Kesme hızının 300 m/min’e artırılmasıyla bu oranlama; SK’de %41, KBN’de %12, ÇKE’de %13 şeklinde gerçekleşmiştir. İlerleme miktarının iki katına çıkmasıyla F_r/F_f oranı, 75 m/min kesme hızında SK’de %11, KBN’de %11, ÇKE’da %21; 300 m/min kesme hızında SK’de %29, KBN’de %10, ÇKE’da %20 şeklinde olmuştur.

7.2.2. Yüzey pürüzlülüğünün değerlendirilmesi

Malzemelerin işlenebilirliğinin değerlendirilmesinde kullanılan önemli kriterlerden birisi de işlenen yüzeylerden ölçülen yüzey pürüzlülük değerleridir [123]. Bu amaçla, işleme deneyleri sonrasında numunelerde elde edilen yüzeylerin her biri üzerinden üç adet pürüzlülük ölçümü yapılmıştır. Kesme kuvveti deneyleri iki defa tekrarlanarak yapıldığı için toplam altı adet pürüzlülük ölçümü gerçekleştirilmiş olup elde edilen değerlerin aritmetik ortalaması alınmıştır. SK, KBN ve ÇKE malzemesindeki kesici takımlar ile gerçekleştirilen kesme deneyleri sonrasında elde edilen ortalama yüzey pürüzlülük (R_a) değerleri Çizelge 7.3’de verilmiştir.

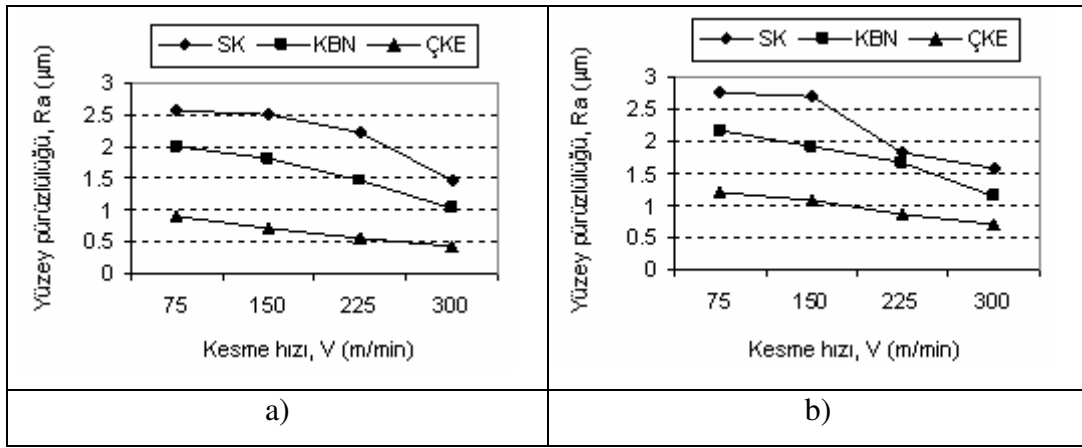
Çizelge 7.3. Ortalama yüzey pürüzlülüğü (R_a) sonuçları

Kesici takım malzemesi	Kesme hızı (V), m/dak	İlerleme (f), mm/dev	R_a μm			
			Alumix 231	%5 SiC	%10 SiC	%15 SiC
KBN	75	0,1	2	1,67	1,39	1,4
	150		1,8	1,54	1,27	1,2
	225		1,46	1,31	1,05	0,9
	300		1,02	1,03	0,8	0,7
SK	75		2,56	2,01	1,79	1,76
	150		2,5	1,96	1,69	1,66
	225		2,22	1,67	1,22	1,1
	300		1,46	1,07	1	0,8
ÇKE	75		0,9	1,2	1	0,88
	150		0,73	1,04	0,77	0,73
	225		0,57	0,91	0,63	0,55
	300		0,43	0,6	0,48	0,45
KBN	75	0,2	2,15	2,2	1,68	1,85
	150		1,91	2,04	1,53	1,65
	225		1,66	1,8	1,34	1,23
	300		1,14	1,53	1,08	0,87
SK	75		2,74	2,82	2,25	2,42
	150		2,7	2,77	2,18	2,33
	225		1,84	2,17	1,25	1,26
	300		1,58	1,58	1,01	1
ÇKE	75		1,22	1,68	1,34	1,16
	150		1,09	1,5	1,14	0,82
	225		0,88	1,32	0,98	0,7
	300		0,7	0,85	0,67	0,55

Üretilen dört farklı yapıdaki numune üzerinde gerçekleştirilen tornalama işlemi sonucunda meydana gelen ortalama yüzey pürüzlülüklerinin kesici takım malzemeleri ve kesme parametreleri açısından daha detaylı değerlendirilmesi amacıyla Çizelge 7.3'deki R_a değerlerinden yararlanılarak Şekil 7.12-7.16'daki grafikler oluşturulmuştur.

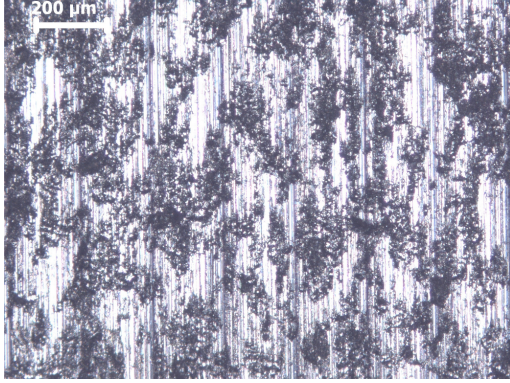
Alumix 231 kodlu numunenin işlenmesinde oluşan ortalama yüzey pürüzlülüğü (R_a) için genel bir değerlendirme yapılacak olursa; bütün takım malzemelerinde kesme hızındaki artışla beraber R_a 'nın azaldığı görülmektedir. Yine ilerleme miktarının 0,1

mm/rev'den 0,2 mm/rev'e çıkarılmasıyla birlikte yüzey pürüzlülük değerlerinde bir artış meydana gelmiştir. Ancak SK kesici takımla 0,1 mm/rev ilerlemede, kesme hızı 75 m/min'den 150 m/min'e artırıldığında yüzey pürüzlülüğünde önemli bir azalmanın olmadığı (~%3), aynı kesme hızı değerleri için ilerleme 0,2 mm/rev'e çıktığında ise bu oranın daha da düşerek ~%2 seviyelerine kadar azaldığı tespit edilmiştir. Bununla birlikte, 150 m/min'den sonraki tüm kesme hızı değerlerinde SK ile yapılan kesme işlemi sonucunda R_a değerlerinin önemli oranda azaldığı görülmektedir (Şekil 7.12).



Şekil 7.12. Alumix 231 kodlu numune için kesme hızına göre R_a değişimi
a) $f=0,1$ mm/rev, b) $f=0,2$ mm/rev

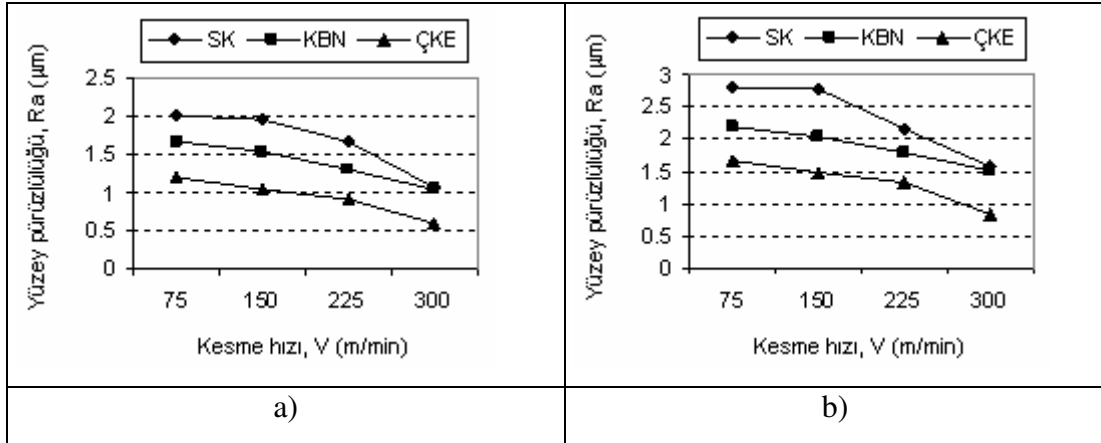
Özellikle 0,2 mm/rev ilerleme miktarı ile işleme sonucunda elde edilen yüzey pürüzlülükleri, KBN kesici ile elde edilen yüzey pürüzlülük değerlerine yakın olduğu görülmektedir (Şekil 7.12b). SK kesici takımında oluşan bu durum, yüksek kesme hızı ve yüksek ilerlemede gerçekleştirilen kesme işleminin kesici takımında burun aşınmasına neden olması (Bkz. Resim 7.6) sonucu meydana gelen talaş oluşumu ile açıklanabilir. Kesici takımındaki burun aşınmasıyla birlikte artan YT kesici takım uç yarıçapını artırarak kesicinin kazıma şeklinde talaş oluşturmaya ve böylece işlenmiş yüzeyde matris malzemesinin yapışmasına neden olmuştur (Resim 7.26).



Resim 7.26. Alumix 231 kodlu numunenin SK ile işlenmesinde oluşan yüzey fotoğrafı ($V=300$ m/min; $f=0,2$ mm/rev)

Resim 7.26'daki yüzey görüntüsü, numunenin işlenmesi sırasında meydana gelen deformasyon sertleşmesi bağlı olarak oluşan YT katmanının [144] kesici takım gibi davranması sonucunda meydana geldiği düşünülmektedir. Alumix 231 kodlu numune üzerinde gerçekleştirilen talaş kaldırma deneyleri sonucunda, işlenmiş yüzeylerden ölçülen R_a değerleri kesici takım malzemelerine göre değerlendirildiğinde; en iyiden en kötüye olacak şekilde ÇKE, KBN ve SK şeklindedir. Kesici takım malzemelerine göre R_a değerlerinin bu sıralamada gerçekleşmesinin esas nedeni olarak, kesici takım malzemelerinin sürtünme katsayısına bağlı olarak meydana gelen talaş oluşumu gösterilebilir. Bu numune için en düşük R_a değeri ÇKE kesici takımla 300 m/min kesme hızı ve 0,1 mm/rev ilerleme miktarında yapılan tornalama sonucunda $0,43 \mu\text{m}$ olarak ölçülmüştür. En yüksek R_a ise $2,74 \mu\text{m}$ olarak SK kesici takımla 75 m/min kesme hızı ve 0,2 mm/rev ilerlemede elde edilmiştir.

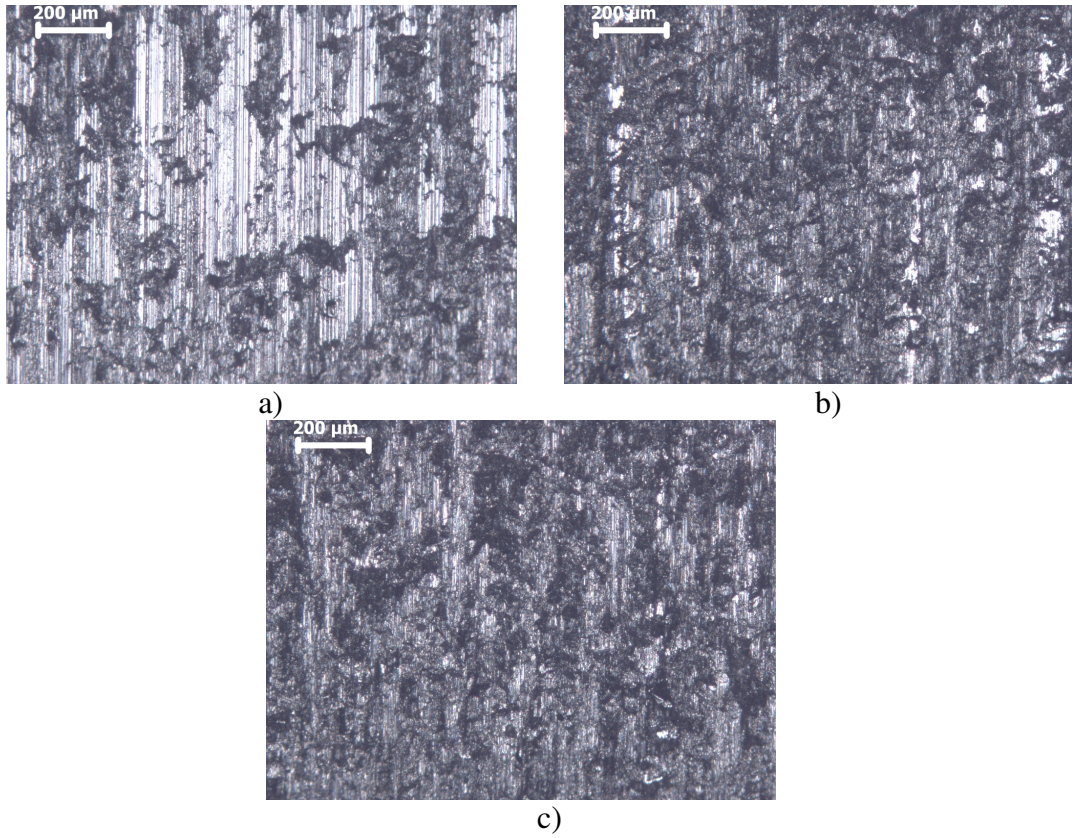
Şekil 7.13'de %5 SiC kodlu numunenin tornalanması sonucunda işlenmiş yüzeylerde oluşan yüzey pürüzlülüklerinin kesme hızına bağlı değişimi grafik olarak verilmiştir.



Şekil 7.13. %5 SiC kodlu numune için kesme hızına göre R_a değişimi
a) $f=0,1$ mm/rev, b) $f=0,2$ mm/rev

%5 SiC kodlu numune üzerinde gerçekleştirilen talaş kaldırma deneyleri sonucunda oluşan yüzey pürüzlülüklerinin genelde kesme hızındaki artışla birlikte azaldığı görülmektedir (Şekil 7.13). İlerleme miktarının 2 katına çıkmasıyla birlikte yüzey pürüzlülükleri ortalama %40 artış göstermiştir. En yüksek pürüzlülük değeri SK kesici takımla 75 m/min kesme hızı ve 0,2 mm/rev ilerlemede yapılan kesme işlemi sonucunda 2,82 μ m olarak ölçülmüştür. En düşük R_a ise ÇKE kesici takımla 300 m/min kesme hızı ve 0,1 mm/rev ilerleme miktarında yapılan kesme işlemi sonucunda 0,6 μ m ölçülmüştür.

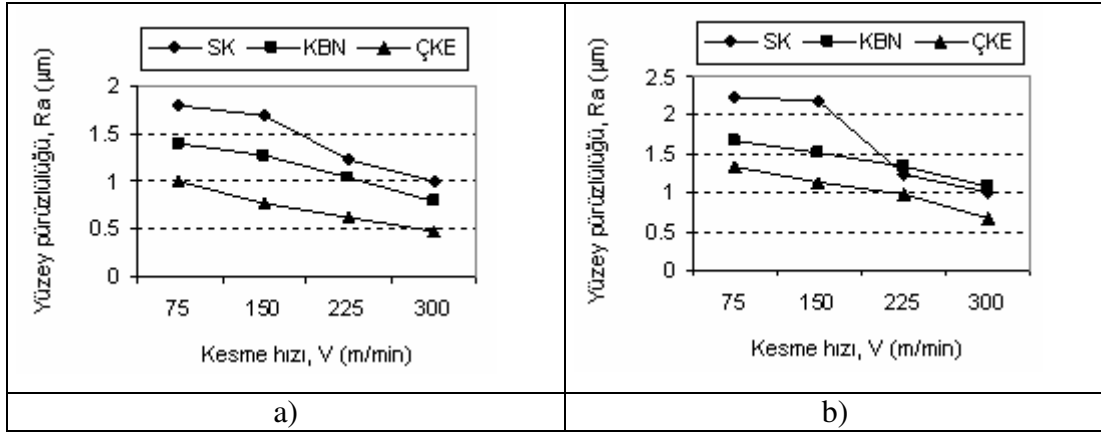
SK kesici takımla her iki ilerleme miktarı için kesme hızının 75 m/min'den 150 m/min'e çıkarılmasıyla yüzey malzemesinde önemli bir iyileşme görülmezken, kesme hızının 225 m/min'e çıkarılmasıyla birlikte özellikle 0,2 mm/rev ilerlemede gerçekleştirilen deney sonucunda R_a 'nın hızla azaldığı görülmektedir. Hatta kesme hızı 300 m/min'e çıkarıldığında R_a değerinin, KBN kesici takımla yapılan deney sonrasında elde edilen R_a ile hemen hemen aynı seviyede olduğu tespit edilmiştir (Şekil 7.13b). SK, KBN ve ÇKE kesici takımlar için en yüksek ilerleme ve en yüksek kesme hızında %5 SiC kodlu numunenin işlenmesinde oluşan yüzey fotoğrafları Resim 7.27'de verilmiştir.



Resim 7.27. %5 SiC kodlu numune için 300 m/min kesme hızı ve 0,2 mm/rev ilerlemede oluşan yüzey fotoğrafları
a) SK kesici, b) KBN kesici, c) ÇKE kesici

Resim 7.27'den görülebileceği gibi, SK kesici ile yapılan kesme işlemi sonucunda işlenmiş yüzeyde oluşan açık gri renkteki bölgeler (yapışan matris malzemesi) diğer kesici takımlara göre daha fazladır. Bu oluşumun, kesici takımındaki aşınmayla birlikte kesici uç yarıçapı etrafında oluşan YT'ın üçüncü deformasyon bölgesi oluşturarak işlenmiş yüzeydeki gözenek ve çukurları doldurması sonucunda olduğu düşünülmektedir.

%10 SiC kodlu numunenin tornalanması sonucunda işlenmiş yüzeylerde oluşan R_a değerlerinin kesme hızına bağlı değişimi Şekil 7.14'de verilmiştir.

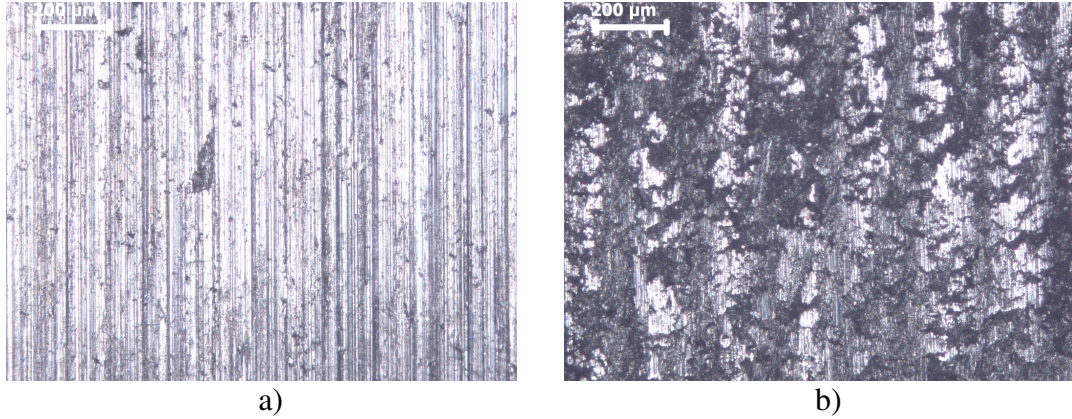


Şekil 7.14. %10 SiC kodlu numune için kesme hızına göre R_a değişimi
a) $f=0,1$ mm/rev, b) $f=0,2$ mm/rev

Şekil 7.14'deki grafikler incelendiğinde, kesme hızındaki artışla beraber SK için ortalama yüzey pürüzlülükleri 150 m/min'den sonra azalırken, KBN ve ÇKE için R_a değerlerinde doğrusal bir azalma eğiliminin olduğu görülmektedir. İlerleme miktarının 0,1 mm/rev'den 0,2 mm/rev'e artmasıyla birlikte R_a değerleri ortalama %28 artmıştır. Bu sonuç, literatürle paralellik arz etmekte [14, 34] olup özellikle parçacık takviyeli kompozit malzemelerin işlenmesinde ilerlemedeki artışın yüzey bütünlüğüne olumsuz etkisini bir kez daha göstermiştir [43, 45]. Ayrıca üç kesici takım malzemesi için %10 SiC kodlu numunede oluşan R_a değerlerinin, %5 SiC kodlu numunenin işlenmesi sonucunda elde edilen R_a değerlerinden ortalama %30 daha düşük seviyelerde olduğu tespit edilmiştir. Bu sonuç, %10 SiC kodlu numune sertliği ve çapraz kırılma dayanımının yüksek olması ile %5 SiC kodlu numunedeki homojen olmayan mikroyapıya atfedilebilir. En düşük R_a değeri ÇKE kesici takımla 300 m/min kesme hızı ve 0,1 mm/rev ilerleme miktarında yapılan kesme işlemi sonrasında 0,48 μ m olarak ölçülmüştür.

Kesme hızının 150 m/min'den sonraki değerleri için %5 SiC kodlu numunede oluşan sürece benzer bir durum %10 SiC kodlu numunede de gözlenmiştir. Özellikle 0,2 mm/rev ilerleme ile 225 m/min ve 300 m/min kesme hızlarında gerçekleştirilen kesme işlemi sonucunda, SK kesici takımla elde edilen R_a değerlerinin, KBN kesici takımla elde edilen R_a değerlerinden daha düşük seviyelerde olduğu gözlenmiştir (Şekil 7.14b). Bu durum, numune içerisindeki SiC_p miktarının fazla olması ve Si fazı

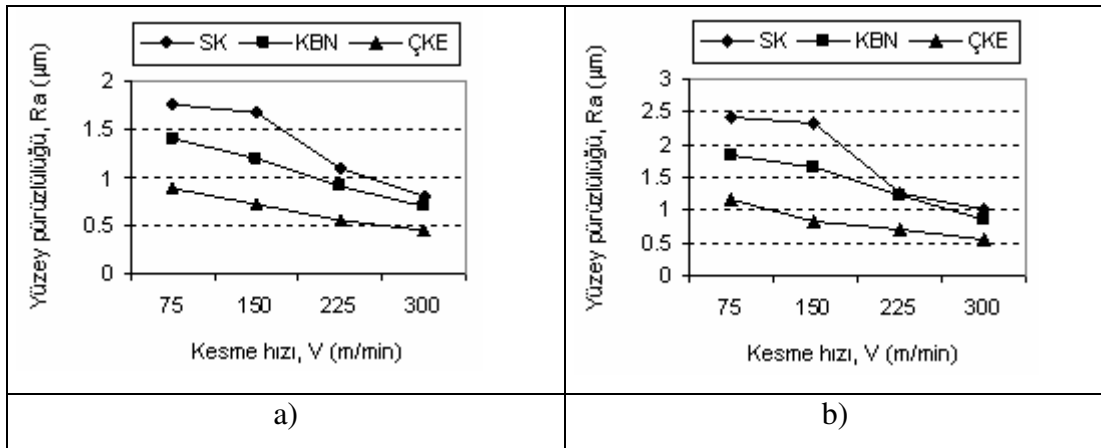
iriliğine bağlı oluşan aşırı takım aşınmasıyla açıklanabilir. Kesici takımdaki aşınma nedeniyle YT'ın yardımcı kesici kenara doğru yayılması ve buna bağlı olarak kesme işleminde üçüncü deformasyon bölgesinin oluşması sonucunda Resim 7.28a'daki yüzey görüntüsü meydana gelmiştir.



Resim 7.28. %10 SiC kodlu numune için 300 m/min kesme hızı ve 0,2 mm/rev ilerlemede oluşan yüzey fotoğrafları
a) SK kesici, b) KBN kesici

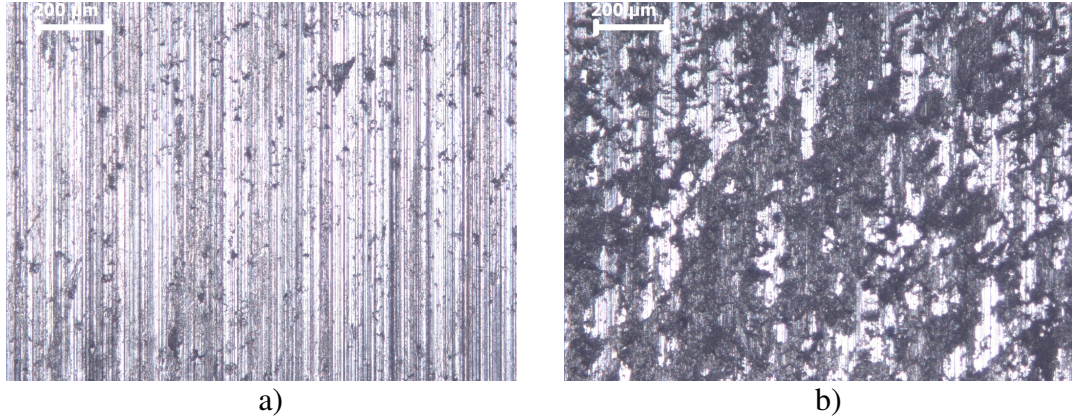
Resim 7.28a'dan da görülebileceği gibi, SK kesici takımla işlenen yüzeyde oluşması muhtemel hataların (çukur, gözenek, yırtılma vb.), kesici takımın aşınma sürecine girmesiyle artan YT nedeniyle işlenmiş yüzeyde yapışma ve deformasyon sertleşmesine bağlı talaş oluşumuyla kapandığı düşünülmektedir. Deformasyon sertleşmesi sonucunda YT kesici takımda bir üçüncü deformasyon bölgesi oluşturarak kazıma şeklinde talaş kaldırmaya başlayacaktır. Bu durumda, talaşların bir kısmı takım yüzeyine yapışarak YT'ın artmasına, bir kısmı da işlenen yüzeyde kalarak yüzey hatalarının kapanmasına neden olacaktır [144]. Böylece, işlenen yüzeylerden ölçülen pürüzlülük değerlerinin düşük seviyelerde elde edilmiş olduğu düşünülmektedir. Aynı kesme şartlarında KBN kesici takımla yapılan kesme işlemi sonrasında oluşan yüzey hatalarının ise kapanmadığı görülmektedir (Resim 7.28b).

%15 SiC kodlu numunenin tornalanması sonucunda işlenmiş yüzeylerde oluşan yüzey pürüzlülüklerinin kesme hızına bağlı değişimi Şekil 7.15'deki grafiklerde gösterilmiştir.



Şekil 7.15. %15 SiC kodlu numune için kesme hızına göre R_a değişimi
a) $f=0,1$ mm/rev, b) $f=0,2$ mm/rev

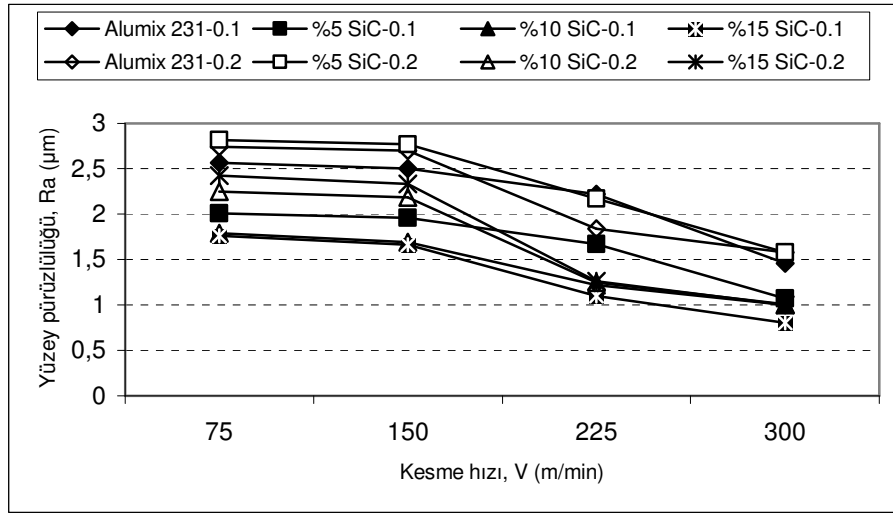
%15 SiC kodlu numunede oluşan yüzey pürüzlülükleri incelendiğinde; diğer numunelerde meydana gelen kesme sürecine benzer bir durum söz konusu olup R_a değerlerinin kesme hızının artmasıyla azaldığı, ilerleme miktarının artmasıyla arttığı görülmektedir (Şekil 7.15). Bununla birlikte, kesme hızının 225 m/min ve 300 m/min olduğu deneylerde SK ile KBN kesicilerle yapılan kesme işlemi sonrasında oluşan R_a değerlerinin birbirine çok yakın olduğu tespit edilmiştir. Bu sonucun, %10 SiC kodlu numunedeki kesme sürecine benzer olarak gerçekleşen talaş oluşumundan kaynaklandığı düşünülmektedir. Resim 7.29a'dan görülebileceği gibi, işlenen yüzeyde oluşacak muhtemel hatalar [43], numuneden kaldırılan talaşların bir kısmı tarafından kapatılmıştır. Bununla birlikte, 0,1 mm/rev ilerleme ve düşük kesme hızlarında %15 SiC kodlu numunenin SK ve KBN kesicilerle işlenmesiyle oluşan R_a değerlerinin aynı şartlarda %10 SiC'de elde edilen R_a 'lardan düşük olduğu tespit edilmiştir (Bkz.Çizelge 7.3).



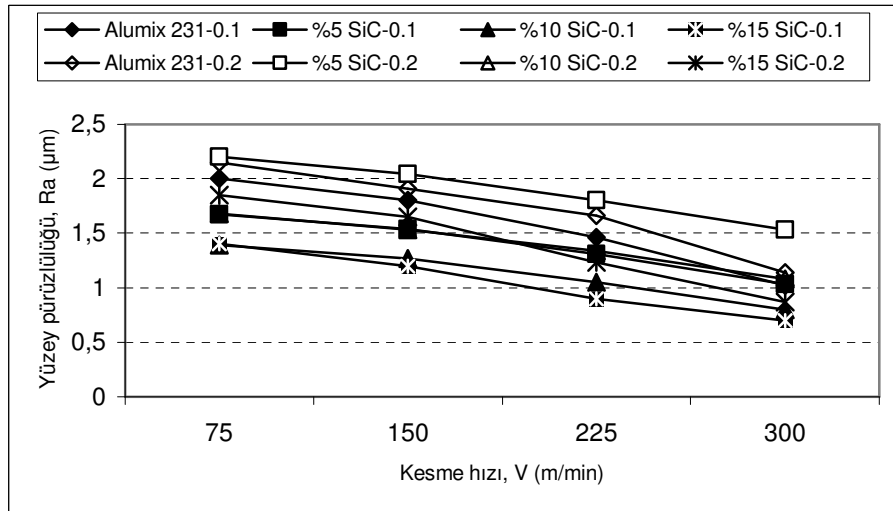
Resim 7.29. %15 SiC kodlu numune için 300 m/min kesme hızı ve 0,2 mm/rev ilerlemede oluşan yüzey fotoğrafları
a) SK kesici, b) KBN kesici

ÇKE kesici takım için %15 SiC kodlu numunede oluşan R_a değerlerinin, %5 ve %10 SiC kodlu numunelerin işlenmesi sonucunda elde edilen R_a değerlerinden, sırasıyla ortalama %43 ve %9 daha düşük seviyelerde olduğu tespit edilmiştir. Bu durum, %15 SiC kodlu numune mikroyapısındaki SiC_p ve Si fazı büyüklüğünün etkisiyle artan sertliğe atfedilmiştir. Ayrıca, SK ve KBN kesicilerde 0,2 mm/rev ilerleme ve 75-150 m/min kesme hızlarında elde edilen R_a değerlerinin, %10 SiC kodlu numunenin işlenmesi sonrasında ölçülen R_a değerlerinden büyük olduğu tespit edilmiştir (Bkz. Çizelge 7.3). Nispeten düşük kesme hızında oluşan bu sonucun %15 SiC kodlu numunedeki gözenekliliğe bağlı olarak kesme işleminin kısmen de olsa kesikli kesme gibi gerçekleşmesiyle oluştuğu düşünülmektedir.

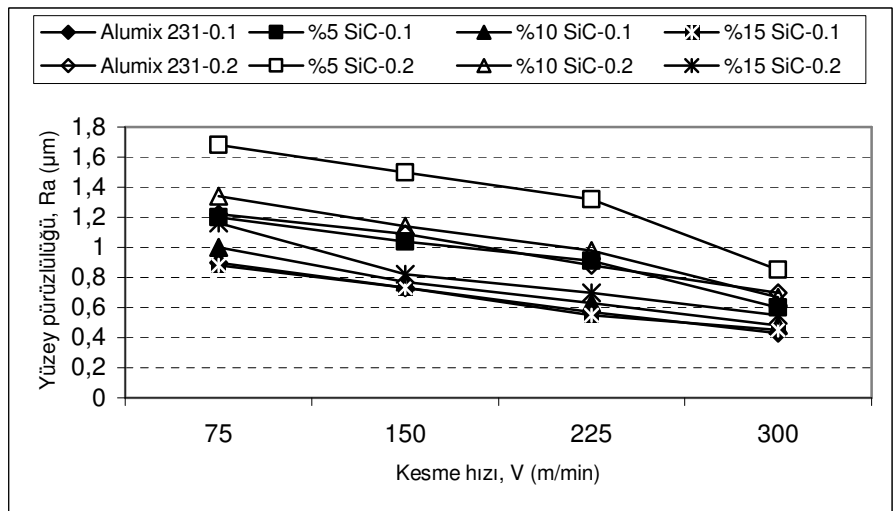
%15 SiC kodlu numune için R_a değerleri kesici takım malzemeleri açısından karşılaştırıldığında; en iyiden en kötüye olacak şekilde ÇKE, KBN ve SK şeklinde olduğu tespit edilmiştir. En düşük R_a değeri, ÇKE kesici takımla 0,1 mm/rev ilerleme miktarı ve 300 m/min kesme hızında işlenmesi sonucunda ölçülmüştür ($R_a=0,45 \mu m$). En yüksek R_a değeri SK kesici takımla 0,2 mm/rev ilerleme ve 75 m/min kesme hızında yapılan deney sonucunda $2,42 \mu m$ olarak bulunmuştur. Şekil 7.16'daki grafikler yardımıyla, toz metalurjisiyle üretilen dört farklı numune için SK, KBN ve ÇKE kesici takımların yüzey pürüzlülüğü üzerindeki performansı birlikte değerlendirilmiştir.



a)



b)



c)

Şekil 7.16. R_a 'nın kesme hızı ve ilerlemeye göre değişimi

a) SK takım; b) KBN takım; c) ÇKE takım

Şekil 7.16a incelenecek olursa; en kötü yüzey pürüzlülüğünün %5 SiC kodlu numunenin 0,2 mm/rev ilerleme ve 75 m/min kesme hızında SK kesici takımla işlenmesiyle meydana geldiği görülmektedir. Ayrıca 225 m/min ve 300 m/min kesme hızlarında Alumix 231 kodlu numune yüzeylerinden ölçülen R_a değerleri, %5 SiC kodlu numuneden elde edilen R_a değerlerine çok yakın olduğu görülmektedir. Ancak KBN ve ÇKE kesici takım malzemeleri için de en kötü R_a değerlerinin, yine %5 SiC kodlu numunenin 0,2 mm/rev ilerlemede işlenmesiyle oluştuğu görülmektedir (Şekil 7.16b ve Şekil 7.16c). Bunlara ilave olarak, 0,1 mm/rev ilerlemede aynı numuneden elde edilen R_a değerlerinin Alumix 231'den düşük, %10 SiC ve %15 SiC kodlu numunelerden yüksek olduğu tespit edilmiştir. Bütün bu sonuçlar, üretimi yapılan numuneler arasında, yüzey pürüzlülüğü açısından en kötü işlenebilirliğe sahip numunenin %5 SiC olduğunu işaret etmektedir.

Şekil 7.16'dan, bütün numuneler için kesme hızının 75 m/min'den 150 m/min'e artırılmasıyla SK kesici takımla yapılan deneylerde yüzey pürüzlülüğünde kayda değer bir azalmanın olmadığı görülmektedir. Bu oluşum, üç takım malzemesi arasında en yüksek sürtünme katsayısına sahip olan SK'de oluşan YT miktarının büyük olmasına atfedilmektedir. ÇKE ve KBN kesici takımlarda ise kesme hızının artmasıyla R_a değerlerinde doğrusal bir azalma eğilimi oluşmuştur. Deney parametrelerine göre yüzey malzemesi açısından en ağır şartlar sayılabilecek olan 0,2 mm/rev ilerleme 75 m/min kesme hızında, %5 SiC kodlu numunenin işlenmesinde SK'ye göre KBN kesiciyle yapılan deneylerde 0,62 μm , ÇKE kesiciyle 1,1 μm 'lik bir iyileşme meydana gelmiştir. Aynı şartlarda diğer numuneler değerlendirildiğinde; %10 SiC için KBN'de 0,57 μm , ÇKE'da 0,91 μm 'lik bir iyileşme elde edilirken, %15 SiC için bu oranlama KBN'de 0,57 μm ve ÇKE'da 1,26 μm olarak gerçekleşmiştir. Bu oranlardan, kompozit numunelerin işlenmesinde yüzey pürüzlülüğü açısından en iyi performansı sağlayan kesici takım malzemesinin ÇKE olduğu açıkça görülmektedir.

8. SONUÇ VE ÖNERİLER

Toz metalurjisi yöntemiyle üretilen Al-Si alaşımı matrisli SiC_p takviyeli kompozit malzemelerin mikroyapı, bazı mekanik özellikleri ve işlenebilirliklerinin incelendiği bu çalışmadan elde edilen sonuçlar ve ileride yapılabilecek çalışmalar için bazı öneriler aşağıda özetlenmiştir:

- Geleneksel TM yöntemiyle takviyesiz matris alaşımı (Alumix 231) ve ağırlıkça %5, %10, %15 SiC_p takviyeli kompozit numunelerin üretimi başarıyla gerçekleştirilmiştir.
- Mikroyapı incelemeleri sonunda üretilen numunelerin hepsinde ötektik Si fazının meydana geldiği görülmüştür. Alumix 231 kodlu numunede Si fazının daha küçük boyutlu ve tane sınırlarına doğru çekirdeklendiği görülürken, kompozit numunelerde Si fazının irileştiği ve yer yer dallantılı bir formda meydana geldiği tespit edilmiştir.
- Numunelerin hepsinde gözeneklilik meydana gelmiş olup gözeneklilik en fazla %15 SiC kodlu numune görülmüştür. Bu numunedeki sinterlenmiş yoğunluk 2,475 gr/cm³ olarak ölçülürken, %93'lük bir teorik yoğunluk hesaplanmıştır.
- En yüksek teorik yoğunluk değeri Alumix 231 kodlu numunede (%98) elde edilirken, kompozitlerin teorik yoğunlukları büyükten küçüğe sıralanacak olursa; %5 SiC, %10 SiC, %15 SiC şeklinde meydana gelmiştir.
- Numuneler arasında en yüksek sertlik değeri %15 SiC takviyeli kompozit malzemedeki 104 VH5 olarak elde edilmiştir. Bu sonuç, numune içerisindeki SiC takviye oranının daha fazla olması ve sinterleme sonrasında mikroyapıda oluşan Si fazı irileşmesine atfedilmiştir.

- En yüksek çapraz kırılma dayanımı Alumix 231 kodlu numunede (189 MPa) elde edilirken, kompozit numuneler arasında en iyi ÇKM değeri %10 SiC kodlu numunede 172 MPa olarak bulunmuştur.
- Numunelerin işlenmesi sırasında ölçülen kesme kuvvetlerinde, kesme hızının 75 m/min'den ve 150 m/min'e çıkarılmasıyla kayda değer bir azalmanın olmadığı tespit edilmiştir. Ancak kesme hızının 150 m/min'den sonraki değerlerinde, SK kesici takım hariç, KBN ve ÇKE kesici takımlar için kesme kuvvetlerinde göze çarpan bir azalma meydana gelmiştir.
- SK kesici takımlarda, Alumix 231 ve %5 SiC kodlu numunelerin 300 m/min kesme hızında işlenmesi dahil olmak üzere, %10 SiC ve %15 SiC kodlu numunelerin tüm kesme hızlarında işlenmesi sonrasında takımın burun bölgesinde aşınmalar meydana gelmiştir.
- 75 m/min kesme hızında işlenen numunelerin tamamında kesici takım malzemelerinin hepsinde YT meydana gelmiş olup özellikle SK kesici takımlar için kesme hızının artmasıyla oluşan aşınmaya bağlı olarak YT miktarı artmıştır.
- Düşük kesme hızında elde edilen talaş kökü incelemeleri sonrasında YT'nin, ikinci deformasyon bölgesinde takım-talaş temas uzunluğunu artırdığı ve bunun sonucunda kesme kuvvetlerinin yükseldiği tespit edilmiştir.
- Numunelerin işlenmesi sırasında ölçülen kesme kuvveti bileşenlerinin büyükten küçüğe doğru sıralaması; F_c , F_r ve F_f şeklinde olduğu görülmüştür. F_r 'nin F_f 'den daha büyük ölçülmesi, çoğunlukla kesici takım yanaşma açısının 75° , kesici takım uç yarıçapının büyük (0,8 mm) olması ile kısmen de olsa kesici takımın talaş açısının negatif (-6°) olmasına atfedilmiştir.
- Kompozit numunelerin işlenebilirliği F_c açısından değerlendirildiğinde; takviye oranındaki artışla birlikte F_c kuvvetlerinin arttığı tespit edilmiştir. En yüksek F_c

değeri, 0,2 mm/rev ilerleme ve 75 m/min kesme hızında %15 SiC kodlu numunenin SK kesici takımla işlenmesinde 317,21 N olarak ölçülmüştür. % 15 SiC kodlu numunenin işlenmesinde oluşan en düşük F_c değeri, 0,1 mm/rev ilerleme ve 300 m/min kesme hızında ÇKE kesici takımla yapılan deneyde 72,5 N olarak bulunmuştur.

- Bütün kesici takım malzemelerinde kesme hızındaki artışla beraber R_a azalırken, ilerleme miktarının 0,1 mm/rev'den 0,2 mm/rev'e çıkarılmasıyla birlikte R_a değerleri artmıştır.
- En kötü yüzey pürüzlülüğü, %5 SiC kodlu numunenin 0,2 mm/rev ilerleme ve 75 m/min kesme hızında SK kesici takımla işlenmesiyle 2,82 μm olarak ölçülmüştür. Aynı kesme şartlarında, %5 SiC kodlu numunenin işlenmesinde SK'ye göre KBN kesiciyle yapılan deneylerde 0,62 μm , ÇKE kesiciyle 1,1 μm 'lik bir iyileşme meydana gelmiştir.
- En iyi yüzey pürüzlülüğü, %15 SiC kodlu numunenin 0,1 mm/rev ilerleme ve 300 m/min kesme hızında PCD kesici takımla işlenmesiyle 0,45 μm olarak elde edilmiştir.
- ÇKE kesici takım için %15 SiC kodlu numunede oluşan R_a değerlerinin, %5 ve %10 SiC kodlu numunelerin işlenmesi sonucunda elde edilen R_a değerlerinden, sırasıyla ortalama %43 ve %9 daha düşük seviyelerde olduğu tespit edilmiştir.
- 225 ve 300 m/min kesme hızlarında SK kesici takımlarda oluşan YT, kesme işleminin kazıma şeklinde oluşmasına neden olmuş ve böylece KBN kesicide elde edilen R_a değerlerine çok yakın yüzey pürüzlülükleri elde edilmiştir.
- Kesici takımların performansı yüzey kalitesi açısından değerlendirilmiş olup en iyiden en kötüye doğru ÇKE, KBN ve SK kesici takım şeklinde gerçekleşmiştir.

- Kesici takım kalitelerinin tamamında, %10 SiC kodlu numunede oluşan R_a değerlerinin, %5 SiC kodlu numunenin işlenmesi sonucunda elde edilen R_a değerlerinden ortalama %30 daha düşük seviyelerde olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, 0,2 mm/rev ilerlemede bütün kesme hızları için kesici takımların hepsinde %10 SiC kodlu numunenin işlenmesiyle elde edilen R_a değerleri, aynı şartlarda %15 SiC kodlu numuneden elde edilen R_a değerlerinden düşük ölçülmüştür. Bu değerlendirmeler sonucunda, yüzey pürüzlülüğü açısından işlenebilirliği en iyi numune %10 SiC, en kötü numune ise %5 SiC kodlu numune olarak belirlenmiştir.

Elde edilen bu sonuçlara göre, bundan sonra yapılacak çalışmalar için şu öneriler yapılabilir:

- Alumix 231 alaşım matrisli SiC_p takviyeli kompozitlerin aşınma özellikleri, yorulma ve çekme dayanımları gibi mekanik özellikleri detaylı olarak incelenebilir.
- Numunelerdeki gözenekliliği azaltmak için sinterleme işlemi vakumlu ısıtma işlem fırınlarında yapılabilir.
- Numunelerin işlenebilirliği KBN ve ÇKE kesici takımlar ile daha yüksek kesme hızlarında araştırılabilir.
- İşlenen numunelerin yüzey bütünlüğünü değerlendirebilmek için işlenmiş yüzeylerin mikrosertlik ölçümleri yapılarak yüzeylerde oluşan hatalar daha detaylı araştırılabilir.
- Takviye elamanı tipi, boyutu ve yüzde hacim oranları değiştirilerek, bu üretim parametrelerinin mekanik ve işlenebilirlik özellikleri üzerindeki etkileri incelenebilir.
- Toz metalurjisi yöntemiyle üretilen bu numunelere delme, vida açma gibi bitirme işlemleri uygulanarak farklı işlenebilirlik özellikleri araştırılabilir.

KAYNAKLAR

1. Chawla, N., Chawla, K.K., “Metal matrix composites”, *Springer Science Business Media, Inc.*, Boston, 5-101 (2006).
2. Chan, R.W., Haasen, P., Kramer, E.J., “Structure and properties of composites”, *Materials Science and Technology*, 13: 1-339 (1993).
3. Jacobs, A.J., Kilduff, T.F., “Engineering Materials Technology: Structure, Processing, Properties and Selection”, 5. Edition, *Prentice-Hall Inc.*, USA, 357-397, 645-749 (2005).
4. İnem, B., “The development of the structures and properties of magnesium matrix silicon carbide reinforced composites”, Ph.D Thesis, *School of Materials, University of Leeds*, England, Leeds, 1-50 (1993).
5. Ibrahim, I.A., Mohamed, F.A., Lavernia, E.J., “Particulate Reinforced Metal Matrix Composites-a review”, *Journal of Materials Science*, 26: 1137-1156 (1991).
6. Akoral, E., “Toz metalurjisi yöntemi ile Al-SiC kompozit malzeme üretimi ve işlenebilirliğinin incelenmesi”, Doktora Tezi, *Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Manisa, 32-45 (2003).
7. Bahçeci, E., “Al Matrisli α -Si₃N₄ Takviyeli Kompozit Malzeme Üretimi Ve İşlenebilirliğinin Karakterizasyonu”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 4-24 (2006).
8. Groover, M.P., “Fundamentals of modern manufacturing: Materials, processes, and systems”, *Prentice-Hall Inc.*, New Jersey, USA, 251-639 (1996).
9. Kök, M., “Metal Matrisli (Al₂O₃ takviyeli) Kompozit Malzemelerin Üretimi ve Seramik Takımlarla İşlenebilirliğin Araştırılması”, Doktora Tezi, *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Elazığ, 34-75 (2000).
10. Hyo, S.L., Jae, S.Y., Soon, H.H., Duk, J.Y., Kyung, H.N., “The fabrication process and mechanical properties of SiCp/Al-Si metal matrix composites for automobile air-conditioner compressor pistons”, *Journal of Materials Processing Technology*, 113: 202-208 (2001).
11. Çiftçi, İ., “Alüminyum esaslı kompozitlerde takviye oranı ve boyutunun mekanik özellikler ve işlenebilirlik üzerine etkisinin araştırılması”, Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 16-90 (2003).
12. Zhang, Z.F., Zhang, L.C., Mai, Y.W., “Wear of ceramic particle reinforced metal-matrix composites: Part I. Wear mechanism”, *Journal of Material Science*, 30: 1961-1966 (1995).

13. Antonio, C.A.C., Davim, J.P., "Optimal cutting conditions in turning of particulate metal matrix composites based on experimental and a genetic search model", *Composites: Part A*, 33: 213-219 (2002).
14. Davim, J.P., "Diamond tool performance in machining metal-matrix composites", *Journal of Material Processing Technology*, 128: 100-105 (2002).
15. Gür, C.H., "Ultrasonik Boyuna Dalga hız ölçümleri ile SiC takviyeli alüminyum metal matrisli kompozitlerde mikroyapı tayini", *4th International Powder Metallurgy Conference*, Sakarya, 439-446 (2005).
16. Hashim, J., Looney, L., Hashmi, M.S.J., "The enhancement of wettability of SiC particles in cast aluminium matrix composites", *Journal of Materials Processing Technology*, 119: 329-335 (2001).
17. Hashim, J., Looney, L., Hashmi, M.S.J., "Particle distribution in cast metal matrix composites-Part II", *Journal of Materials Processing Technology*, 123: 258-263 (2002).
18. Lou, D., Hellman, J., Luhulima, D., Liimatainen, J., Lindroos, V.K., "Interactions between tungsten carbide (WC) particulates and metal matrix in WC-reinforced composites", *Materials Science and Engineering A*, 340: 155-162 (2003).
19. Tsunekawa, Y., Suzuki, H., Genma, Y., "Application of ultrasonic vibration to in situ MMC process by electromagnetic melt stirring", *Materials and Design*, 22: 467-472 (2001).
20. Daoud, A., Abo-Elkhar, M., "Influence of Al₂O₃ or ZrO₂ particulate addition on the microstructure aspects of AlNi and AlSi alloys", *Journal of Materials Processing Technology*, 120: 296-302 (2002).
21. Carreno-Morelli, E., Cutard, T., Schaller, R., Bonjour, C., "Processing and characterization of aluminium-based MMCs produced by gas pressure infiltration", *Materials Science and Engineering A*, 251: 48-57 (1998).
22. Eroğlu, S., Baykara, T., "Effects of powder mixing technique and tungsten powder size on the properties of tungsten heavy alloys", *Journal of Materials Processing Technology*, 103: 288-292 (2000).
23. Davidson, A.M., Regener, D., "A comparison of aluminium-based metal-matrix composites reinforced with coated and uncoated particulate silicon carbide", *Composites Science and Technology*, 60: 865-869 (2000).
24. Peng, H.X., Fan, Z., Mudher, D.S., Evans, J.R.G., "Microstructures and mechanical properties of engineered short fibre reinforced aluminium matrix composites", *Materials Science and Engineering A*, 335: 207-216 (2002).

25. Li, G., Huang, X., Guo, J., “Fabrication and mechanical properties of Al_2O_3 -/Ni composite from two different powder mixtures”, *Materials Science and Engineering A*, 352: 23-28 (2003).
26. Tham, L.M., Gupta, M, Cheng, L., “Effect of limited matrix–reinforcement interfacial reaction on enhancing the mechanical properties of aluminium–silicon carbide composites”, *Acta Materialia*, 49: 3243-3253 (2001).
27. Han, Y., Liu, X., Bian, X., “In situ TiB_2 particulate reinforced near eutectic Al–Si alloy composites”, *Composite Part A*, 33: 439-444 (2002).
28. Sur, G., “Karma Takviyeli Alüminyum Matriksli Kompozitlerin Üretimi, Mekanik Özellikler ve İşlenebilirliklerinin İncelenmesi”, Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 42-60 (2008).
29. Abd El-Azim, A.N., Kassem, M.A., El-Baradie, Z.M., Waly, M., “Structure and properties of short alumina fibre reinforced AlSi18CuNi produced by stir casting”, *Materials Letters*, 56: 963-969 (2002).
30. Tekmen, C., Ozdemir, I., Cocen, U., Onel, K., “The mechanical response of Al-/Si-/Mg/SiCp composite: influence of porosity”, *Materials Science and Engineering A*, 360: 365-371 (2003).
31. Moustafa, S.F., Abdel-Hamid, Z., Abd-Elhay, A.M., “Copper matrix SiC and Al_2O_3 particulate composites by powder metallurgy technique”, *Materials Letters*, 53: 244-249 (2002).
32. Fogagnolo, J.B., Robert, M.H., Ruiz-Navas, E.M., Torralba, J.M., “6061 Al reinforced with zirconium diboride particles processed by conventional powder metallurgy and mechanical alloying, *Journal of Materials Science*, 39: 127-132 (2004).
33. Al-Hajri, A., “Understanding the mechanical behavior of particulate reinforced metal matrix composites”, PhD thesis, *The Graduate Faculty of The University of Akron*, USA, 73-116 (2003).
34. Kishawy, H.A., Kannan, S., Balazinski, M., “Analytical modeling of tool wear progression during turning particulate reinforced composites”, *Annual CIRP*, 54 (1): 55 (2005).
35. Manna, A., Bhattacharyya, B., “A study on machinability of Al/SiC-MMC”, *Journal of Materials Processing Technology*, 140: 711-716 (2003).
36. Krishnamurthy, L., Sridhara, B.K., Budan, D.A., “Comparative study on the machinability aspects of aluminium silicon carbide and aluminium graphite composites”, *Materials and Manufacturing Processes*, 22: 903-908 (2007).

37. Pedersen, W., Ramulu, M., "Facing SiCp/Mg metal matrix composites with carbide tools", *Journal of Materials Processing Technology*, 172: 417-423 (2006).
38. Özben, T., Kılıçkap, E., Çakır, O., "Investigation of mechanical and machinability properties of SiC particle reinforced Al-MMC", *Journal of Materials Processing Technology*, 198: 220-225 (2008).
39. Kılıçkap, E., Çakır, O., Aksoy, M., İnan, A., "Study of tool wear and surface roughness in machining of homogenised SiC-p reinforced aluminium metal matrix composite", *Journal of Materials Processing Technology*, 164-165: 862-867 (2005).
40. Lin, J.T., Bhattacharyya, D., Kecman, V., "Multiple regression and neural networks analyses in composites machining", *Composites Science and Technology*, 63: 539-548 (2003).
41. Reddy, N.S.K., Sup, S.K., Yang, M., "Experimental study of surface integrity during end milling of Al/SiC particulate metal-matrix composites", *Journal of Materials Processing Technology*, 201: 574-579 (2008).
42. Ding, X., Liew, W.Y.H., Liu, X.D., "Evaluation of machining performance of MMC with PCBN and PCD tools", *Wear*, 259: 1225-1234 (2005).
43. Zhu, Y., Kishawy, H.A., "Influence of alumina particles on the mechanics of machining metal matrix composites", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 45: 389-398 (2005).
44. Kannan, S., Kishawy, H.A., "Surface characteristics of machined aluminium metal matrix composites", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 46: 2017-2025 (2006).
45. Kannan, S. Kishawy, H.A., "Tribological aspects of machining aluminium metal matrix composites", *Journal of Material Processing Technology*, 198: 399-406 (2008).
46. Uday, A.D., Suhas, S.J., Balasubramaniam, R., Bhanuprasad, V.V., "Surface finish and integrity of machined surfaces on Al/SiCp composites", *Journal of Materials Processing Technology*, 192-193: 166-174 (2007).
47. Özçatalbaş, Y., "Investigation of the machinability behaviour of Al₄C₃ reinforced Al-based composite produced by mechanical alloying technique", *Composites Science and Technology*, 63: 53-61 (2003).
48. Pramanik, A., Zhang, L.C., Arsecularatne, J.A., "Prediction of cutting forces in machining of metal matrix composites", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 46: 1795-1803 (2006).

49. Karakaş, M.S., Acır, A., Übeyli, M., Ögel, B., “Effect of cutting speed on tool performance in milling of B₄Cp reinforced aluminum metal matrix composites”, *Journal of Materials Processing Technology*, 178: 241-246 (2006).
50. Çiftçi, İ., Türker, M., Şeker, U., “Evaluation of tool wear when machining SiCp-reinforced Al-2014 alloy matrix composites”, *Materials and Design*, 25: 251-255 (2004).
51. Davim, P.J., “Diamond tool performance in machining metal–matrix composites”, *Journal of Materials Processing Technology*, 128: 100-105 (2002).
52. Özcatılbaş, Y., “Chip and built-up edge formation in the machining of in situ Al₄C₃–Al composite”, *Materials and Design*, 24: 215-221 (2003).
53. Çiftçi, İ., Türker, M., Şeker, U., “CBN cutting tool wear during machining of particulate reinforced MMCs”, *Wear*, 257: 1041-1046 (2004).
54. Hung, N.P., Boey, F.Y.C., Khor, K.A., Oh, C.A., Lee, H.F., “Machinability of cast and powder-formed aluminium alloys reinforced with SiC particles”, *Journal of Materials Processing Technology*, 48: 291-297 (1995).
55. Clark, I.E., “A guide to machining metal matrix composites with syndite PCD”, *Machining Guide*, IDR3: 135-138 (1994).
56. Andrewes, C.J.E., Feng, H.Y., Lau, W.M., “Machining of an aluminum/SiC composite using diamond inserts”, *Journal of Materials Processing Technology*, 102: 25-29 (2000).
57. Kapranos, P., Kirkwood, D.H., Atkinson, H.V., Rheinlander, J.T., Bentzen, J.J., Toft, P.T., Debel, C.P., Laslaz, G., Maenner, L., Blais, S., Rodriguez-Ibabe, J.M., Lasa, L., Giordano, P., Chiarmetta, G., Giese, A., “Thixoforming of an automotive part in A390 hypereutectic Al–Si alloy”, *Journal of Materials Processing Technology*, 135: 271-277 (2003).
58. Weeton, J.W., Peters, D.M., Thomas, K.L., “Engineers’ guide to composite materials”, *American Society for Metals*, 1-10 (1990).
59. Schwartz, M.M., “Composites Materials: Volume I”, *Prentice Hall PTR*, Upper Saddle River, New Jersey, 10-42 (1996).
60. Smith, W.F., “Structure and Properties of Engineering Alloys”, Cilt 2, Çeviri Editörü: Erdoğan, M., *McGrawhill Inc.*, New York, 342-485 (2001).
61. Çıtak, R., “Metalik Baryum-Alüminyum Başlangıç Tozlarının Düşük Sıcaklıkta Oksidasyonu ile Alüminyum Matrisli Kompozit Üretimi”, Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 21-54 (1998).

62. Askeland, D.R., "The Science and Engineering of Materials", Cilt 1, Çeviri Editörü: Erdoğan, M., *PWS Publishing Company*, Boston, 260-275 (1998).
63. Başçı, Ü.G., "Al₂O₃ Partikül Takviyeli Al-Cu Esaslı Metal Matrisli Kompozit Malzeme Üretimi", Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 30-45 (1999).
64. Huda, D., El Baradie, M.A., Hashmi, M.S.J., "Metal matrix composites: Materials aspects. Part II", *Journal of Materials Processing Technology*, 37: 529-541 (1993).
65. Arslan, N., Kaman, M.O., "Alüminyum, kağıt ve cam elyaf petek yapılı kompozitlerin üretim teknikleri ve mekanik özelliklerinin araştırılması", *D.E.Ü. Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 4 (3): 113-123 (2002).
66. Taya, M., Arsenault, R.J., "Metal Matrix Composites-Thermal and Mechanical Behavior", *Pergamon Pres*, New York, 106-142 (1988).
67. Onat, A., "In-Situ Kompozit Üretim Teknikleri ve XD Sentezi Yöntemi", Teknik Yazı, *Metal Dünyası*, 113: 49-53 (2002).
68. Lilholt, H., "Aspect of Deformation of Metal Matrix Composites", *Materials Science and Engineering A*, 135: 161-171 (1991).
69. Miracle, D.B., "ASM Handbook", *Hardbound*, 21: 1043-1049 (2001).
70. Akbulut, H., "Alümina Fiber Takviyeli Al-Si Metal Matrisli Kompozitlerin Üretimi ve Mikroyapı-Özellik ilişkisinin İncelenmesi", Doktora Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 24-45 (1994).
71. Eliasson, J., Sandstrom, R., "Applications of Alüminum Matrix Composites", "Metal Matrix Composites Part I: Applications and Processing", *Hobbs The Printers Ltd*, U.K, 58-94 (1995).
72. Acılar, M., "Al/ SiC Kompozitlerin Vakum İnfiltrasyon Yöntemi ile Üretimi ve Aşınma Davranışlarının Araştırılması", Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 17-34 (2002).
73. Lindroos, V.K., Talvite, M.J., "Recent advances in metal matrix composites", *Journal of Materials Processing Technology*, 53: 273-284 (1995).
74. Barea, R., Belmonte, M., Osendi, M.I., Miranzo, P., "Thermal conductivity of Al₂O₃/SiC platelet composites", *Journal of the European Ceramic Society*, 23: 1773-1778 (2003).
75. Belmonte, M., Miranzo, P., "Al₂O₃/SiC Platelet Composites: Effect of Sintering Conditions", *Journal of the European Ceramic Society*, 17: 1253-1258 (1997).

76. Demirkesen, E., “Kompozit Malzemeler”, *İstanbul Teknik Üniversitesi Kimya-Metalurji Fakültesi Yayınları*, İstanbul, 10-122 (1991).
77. Hashim, J., Looney, L., Hashmi, M.S.J., “Metal matrix composites: production by the stir casting method”, *Journal of Materials Processing Technology*, 92-93: 1-7 (1999).
78. Clyne, T., Withers, P., “An introduction to metal matrix composites”, *Cambridge University Press*, Cambridge, 1-400 (1993).
79. Taha M.A., El-Mahallawy, N.A., “Metal-matrix composites fabricated by pressure-assisted infiltration of loose ceramic powder”, *Journal of Materials Processing Technology*, 73 (1-3): 139-146 (1998).
80. Çiftçi, İ., “Alüminyum esaslı kompozitlerde takviye oranı ve boyutunun mekanik özellikler ve işlenebilirlik üzerine etkisinin araştırılması”, Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 7-60 (2003).
81. Abd El-Azim, A.N., Kassem, M.A., El-Baradie, Z.M., Waly, M., “Structure and properties of short alumina fibre reinforced AlSi18CuNi produced by stir casting”, *Materials Letters*, 56: 963-969 (2002).
82. Sala, G., “Technology-driven design of MMC squeeze cast connection rods”, *Science and Technology of Advanced Materials*, 3: 45-46 (2002).
83. Krauß, G., Kübler, J., Trentini, E., “Preparation and properties of pressureless infiltrated SiC and AlN particulate reinforced metal ceramic composites based on bronze and iron alloys”, *Materials Science and Engineering A*, 337: 315-322 (2002).
84. Blucher, J.T., “Discussion of a liquid metal pressure infiltration process to produce metal matrix composites”, *Journal of Materials Processing Technology*, 30: 381-390 (1992).
85. Neussl, E., Sahm, P.R., “Selectively fibre-reinforced components produced by modified investment casting process”, *Composites Part A*, 32: 1077-1083 (2001).
86. Ghomashchi, M.R., Vikhrov, A., “Squeeze casting: an overview”, *Journal of Materials Processing Technology*, 101: 1-9 (2000).
87. Satyanarayana, K.G., Ojha, S.N., Naresh Nath Kumar, D., Sastry, G.V.S., “Studies on spray casting of Al-alloys and their composites”, *Materials Science and Engineering A*, 304-306: 627-631 (2001).
88. Zhou, Y., Li, J., Nutt, S., Lavernia, E.J., “Spray forming of ultra-fine SiC particle reinforced 5182 Al-Mg”, *Journal of Materials Science*, 35: 4015-4023 (2000).

89. Jiang, Q.C., Wang, H.Y., Wang, J.G., Guan, Q.F., Xu, C.L., “Fabrication of TiCp/Mg composites by the thermal explosion synthesis reaction in molten magnesium”, *Materials Letters*, 4202: 1-4 (2002).
90. Liu, J., Wang, S., Shi, Z., An, G., “A new process for the fabrication of in-situ particle reinforced metal matrix composites”, *Journal of Materials Processing Technology*, 63: 354-357 (1997).
91. Maity, P.C., Panigrahi, S.C., Chakraborty, P.N., “Mechanical properties of hot worked Al-5CuO particle composite”, *Journal of Materials Processing Technology*, 94: 179-182 (1999).
92. Huda, M.D., Hashmi, M.S.J., “MMCs Materials, Manufacturing and Mechanical Properties”, Metal Matrix Composites part I: Application and processing, *Hobbs The Printers Ltd.*, U.K., 37-63 (1995).
93. Flemings, M.C., Young, K.P., “Rheocasting”, Yearbook of Science and Technology, *McGraw-Hill*, New York, 12-140 (1978).
94. Kirkwood, D.H., “Semisolid Metal Processing”, *Intenational Materials Reviews*, 39:173-189 (1994).
95. Yu, X.X., Lee, W.B., “The design and fabrication of an alumina reinforced aluminum composite material”, *Composites Part A*, 31: 245-258 (2000).
96. Salamcı, E., “Spray casting”, *G.Ü. Fen Bilimleri Dergisi*, 17(2): 155-173 (2004).
97. Lim, S.C., Gupta, M., Ren L., Kwok, J.K.M., “Tribological properties of Al-Cu/SiC_p metal matrix composites fabricated using the rheocasting technique”, *Journal of Materials Processing Technology*, 89 (1): 591-596 (1999).
98. Akdoğan Eker, A., “Kompozit Malzemeler Ders Notu”, *Yıldız Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü*, İstanbul, 5-86 (2008).
99. German, R.M., “Powder Metallurgy & Particulate Materials Processing”, Çeviri Editörleri: Sarıtaş, S., Türker, M., Durlu, N., *MPIF*, New Jersey, 4-272 (2007).
100. Ekşi, A.K., Yüzbaşıoğlu, A.H., “Sintering Of Cold Isostatically Pressed Metalic Powders”, *4th International Powder Metallurgy Conference*, Sakarya, 406-414 (2005).
101. İnternet: “Metal Powder Industries Federation: Powder Metallurgy 2007 Facts”, <http://www.mpf.org> (2008).
102. Türker, M., Özdemir, T.A., Ögel, B., Yavuz, A., “Al-SiC tozlarının mekanik alaşımlama değirmeninde öğütme zamanının kompozit toz yapısına etkisinin araştırılması”, *2. Ulusal Toz Metalurjisi Konferansı*, Ankara, 425-431 (1999).

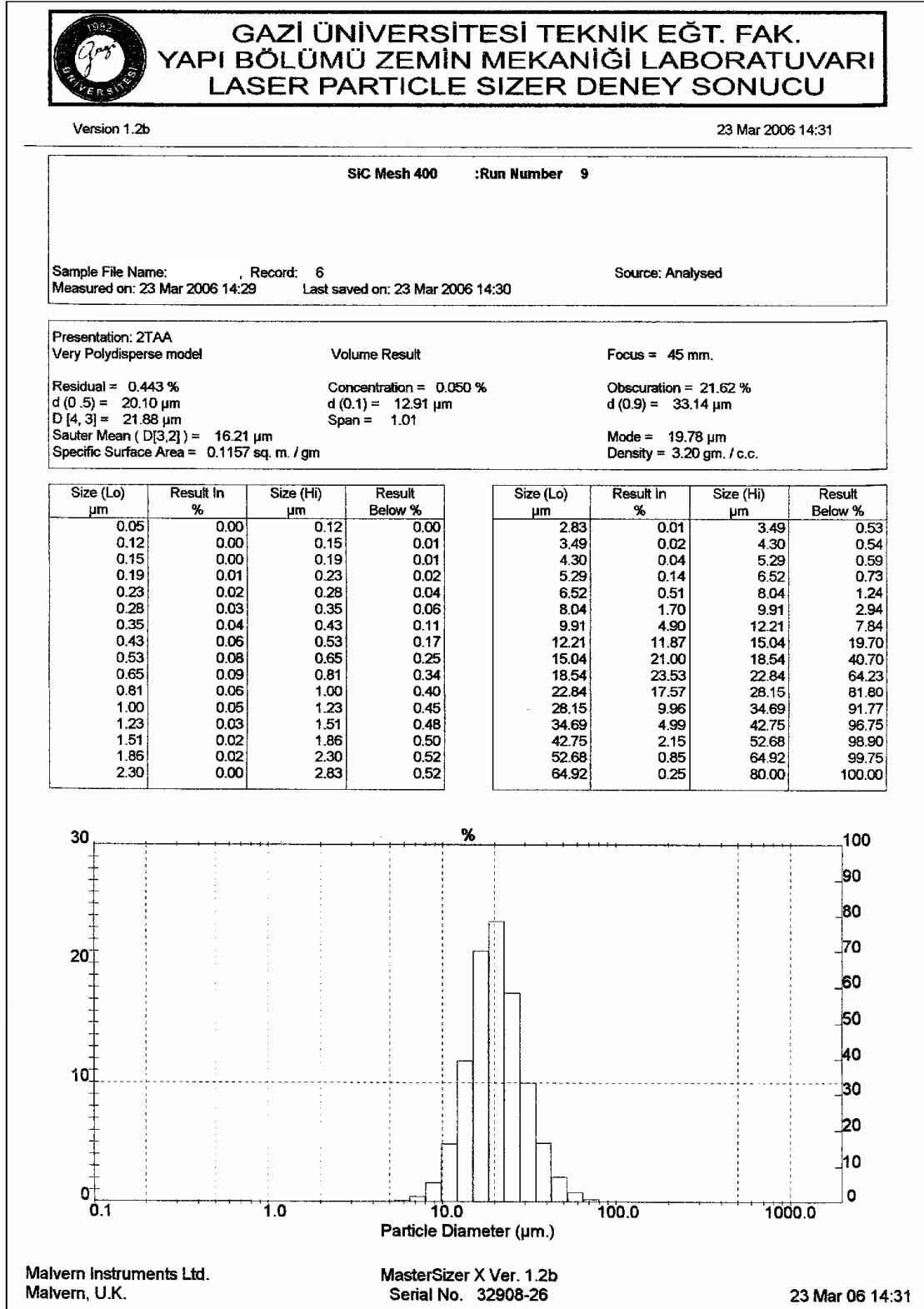
103. İnternet: “Türk Toz Metalurjisi Derneği”,
<http://www.turktoz.gazi.edu.tr/ttmd.tr.htm> (2004).
104. Sarıtaş, S., “Toz Metalurjisi-Bileşik Gereçler-Seramikler”, Makina Mühendisliği El Kitabı, *Makina Mühendisler Odası Yayınları*, 1: 64-115 (1994).
105. Arık, H., Sarıtaş, S., Gündüz, M., “Production of Si_3N_4 by carbothermal reduction and nitridation of sepiolite”, *Journal of Materials Science*, 34: 835-842 (1999).
106. Uslan, İ., “Gaz Atomize Alüminyum Tozlarının Özelliklerine Üretim Değişkenlerinin Etkisinin Araştırılması”, Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 10-75 (1999).
107. Arık, H., “Sepiolitten Karbo-Termal İndirgeme ve Nitrürleme Yoluyla Silisyum Nitrür (Si_3N_4) Seramik Tozu Üretimi ve Parametrelerinin Araştırılması”, Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 1-35 (1999).
108. Davidson, J., “Compressibility of Metal Powders”, *Quebec Metal Powders Ltd*, London, 286-287 (1996).
109. Özkök, Ö., “ α - Si_3N_4 İçeren Alüminyum Matrisli Kompozit Malzeme Üretimi ve Özelliklerin Araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 12-80 (2004).
110. Ekşi, A., Kurt, A.O., “Metal ve Seramik Tozlarının Bilgisayar Kontrollu Tek Eksenli Kalıpta Preslenmesi”, *Uluslararası Katılımlı 2. Ulusal Toz Metalurjisi Konferansı*, Ankara, 557-563 (1999).
111. German, R.M., “Powder Metallurgy Science”, *Metal Powder Industries Federation*, 2nd edition, USA, 5-250 (1994).
112. Carter, B.C., Norton, M.G., “Ceramic Materials Science and Engineering”, *Springer*, New York, 427-461 (2007).
113. Brazenha, M.V.J., “Furnace Atmospheres For Sintering”, *MPR*, 600-4 (1990).
114. “ASM Metals Handbook”, Powder Metallurgy and Applications: Vol.7, *ASM International*, USA, 1145-1180 (1998).
115. Morehead, M.D., “Machinability and Microstructure Stability during the Machining of Pure Copper and Titanium Processed By Equal Channel Angular Pressing”, MSc, Thesis, *Clemson University*, Clemson, 10-140 (2007).
116. Shaw, M.C., “Metal cutting principles”, *Oxford University Press*, Oxford, 1-9 (1989).

117. Davim, J.P., Baptista, A.M., "Relationship between cutting force and PCD cutting tool wear in machining silicon carbide reinforced aluminium", *Journal of Materials Processing Technology*, 103: 417-423 (2000).
118. Ezugwu, E.O., "Key improvements in the machining of difficult-to-cut aerospace superalloys", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 45: 1353-1367 (2005).
119. Hu, X., "An experimental and analytical study of the effect of material microstructures on the machinability of Al-Si alloys", PhD. Thesis, *Michigan Technological University*, Michigan, 20-85 (2005).
120. Sundaram, S., Senthilkumar, P., Kumaravel, A., Manoharan, N., "Study of Flank Wear in Single Point Cutting Tool Using Acoustic Emission Sensor Techniques", *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*, 3 (4): 32-36 (2008).
121. Lee, T.H., "An Experimental and theoretical investigation for the machining of hardened alloy steels", PhD. Thesis, *The University of New South Wales*, Sydney, Australia, 10-120 (2007).
122. Kopaci, J., Bahor, M., "Interaction of the technological history of a workpiece material and the machining parameters on the desired quality of the surface roughness of a product", *Journal of Materials Processing Technology*, 92-93: 381-387 (1999).
123. Trent, E.M., "Metal cutting", *Butterworths Press*, London, 1-171 (1989).
124. Sandvik Coromant, "Modern metal cutting—A practical handbook", English Edition, *Sandvik Coromant*, Sweden, I-III (1994).
125. Zhang, J.H., "Theory and technique of precision cutting", *Pergamon Press*, Oxford, 1-50 (1991).
126. DeGarmo, E.P., Black, J.T., Kohser, R.A., "Materials and processes in manufacturing", *Prentice-Hall Inc.*, New Jersey, 214-652 (1997).
127. Köksal, S., "Face milling of nickel-based superalloys with coated and uncoated carbide tools", PhD thesis, *School of Engineering, Coventry University, England*, Coventry, 1-60 (2000).
128. Kennametal, "Turning Catalog", *Kennametal Hertel*, UK, 10-250 (2008).
129. Özçatalbaşı, Y., Ercan, F., "The effects of heat treatment on the machinability of mild steels", *Journal of Materials Processing Technology*, 6784: 1-12 (2003).

130. Sandvik Coromant, "Turning Catalog", *Sandvik Coromant*, Sweden, 8-300 (2008).
131. Zhang, H., "Plastic Deformation and chip Formation Mechanics during Machining of Copper, Aluminium and an Aluminium Matrix Composite", PhD. Thesis, *University of Windsor*, Canada, 5-106 (2000).
132. Griffin, R.D., Li, H.J., Eleftheriou, E., Bates, C.E., "Machinability of Gray Cast Iron, *American Foundry Society Report*, Alabama, 1-20 (2008).
133. ECKA Granules GmbH & Co.KG, "Metal Powder Technologies: Technical Product Data Sheets", Austria, 1-10 (2008).
134. Internet: "International Town Meeting on SiC/SiC Design and Material Issues for Fusion Systems", <http://www-ferp.ucsd.edu/lib/props/sic.html> (2000).
135. ISO 13320-1, "Particle size analysis-Laser diffraction methods-Part 1: General principles", 1-4 (1999).
136. GLEN MILLS, "Tech Tips Issue 7: Options of 3D mixing", *Glen Mills Inc.*, New Jersey, 1-6 (2008).
137. ASTM B312-96, "Standard Test Method for Gren Strength for Compacted Metal Powder Specimens", 1-6 (2002).
138. ISO 3685, "Tool-life testing with single-point turning tools", 1-12 (1993).
139. Mitsubishi, "Turning Tools Catalog", *Mitsubishi Materials Corporation*, Japan 1-400 (2008).
140. ISO 4288, "Geometrical Product Specifications (GPS) -Surface texture: Profile method-Rules and procedures for the assessment of surface texture", 1-8 (1996).
141. Deshpande, J., "The Effect of Mechanical Mold Vibration On the Characteristics of Aluminum Alloys", MSc. Thesis, *Worcester Polytechnic Institute*, Worcester, 1-45 (2006).
142. Nagarajan, S., Dutta, B., Surappa, M.K., "The effect of SiC particles on the size and morphology of eutectic silicon in cast A356/SiCp composites", *Composites Science and Technology*, 59: 897-902 (1999).
143. Fang, Z.Z., "Correlation of transverse rupture strength of WC-Co with hardness", *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials*, 23: 119-127 (2005).
144. Kalpakjian, S., Schmid, S.R., "Manufacturing Engineering and Technology", Fifth Edition, *Pearson Prentice Hall*, 404-502 (2006).

EKLER

EK-1 SiC parçacıkların boyut analizi



ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : GÜNAY, Mustafa
 Uyruğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 1978/Orhangazi
 Medeni hali : Evli
 Telefon : 0 (312) 202 86 88
 Faks : 0 (312) 212 00 59
 e-mail : mugunay@gazi.edu.tr

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi / Fen Bil. Ens. Mak. Eğt. Böl.	2003
Lisans	Gazi Üniversitesi / Teknik Eğt. Fak. Mak. Böl.	2000
Lise	Bursa Tophane Teknik Lisesi / Makina Bölümü	1996

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2001-2009	Gazi Üniversitesi - Ankara	Araştırma Görevlisi

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

SCI, SCI-Expanded, SSCI, AHCI tarafından taranan bilimsel dergilerde yayımlanan makaleler

1. Günay M., Aslan E., Korkut I., Seker U., Investigation of The Effect of Rake Angle on Main Cutting Force, International Journal of Machine Tools & Manufacture, 44: 953–959 (2004).
2. Günay M., Korkut I., Aslan E., Seker U., Experimental Investigation of The Effect of Cutting Tool Rake Angle on Main Cutting Force, Journal of Materials Processing Technology, 166: 44–49 (2005).
3. Günay M., Seker U., Sur G., Design and Construction of A Dynamometer to Evaluate The Influence of Cutting Tool Rake Angle on Cutting Forces, Materials and Design, 27: 1097–1101 (2006).
4. Yıldız Y., Günay M., Seker U., The Effect of The Cutting Fluid on Surface Roughness in Boring of Low Carbon Steel, Machining Science And Technology, 11 (4): 553–560 (2007).
5. Acır A., Turgut Y., Übeyli M., Günay M., Şeker U., A study on the cutting force in milling of boron carbide particle reinforced aluminum composite, Science and Engineering of Composite Materials, in press (2009).

Ulusal hakemli dergilerde yayımlanan makaleler

1. Günay M., Şeker U., Kesici Takım Talaş Açısının İlerleme Kuvveti Üzerindeki Etkisinin Araştırılması, Journal of Polytechnic, 8 (4): 271-274 (2005).
2. Tekaslan Ö., Gerger N., Günay M., Şeker U., “AISI 304 Östenitik Paslanmaz Çeliklerin Titanyum Karbür Kaplamalı Kesici Takım İle Tornalama İşleminde Kesme Kuvvetlerinin İncelenmesi”, Journal of Engineering Sciences, 13 (2): 129-286 (2007).
3. Günay M., Investigation of the Interaction Between the Surface Quality and Rake Angle in Machining of AISI 1040 Steel, SİGMA-Journal of Engineering and Natural Sciences, 26 (2): 105-111 (2008).

Uluslar arası kongreler:

1. Günay M., Yıldız Y., “Analysis of Cutting Forces on Cutting Tool by Computer Aided Engineering”, 1st International Vocational and Technical Education Technologies Congress, September 5-7, Istanbul/TURKEY, (2005).
2. Sekmen M., Günay M., Çiftçi I., Korkut I., Seker U., “The Influence of Cutting Tool Rake Angle on Cutting Forces When Machining Aluminium Alloys”, International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st Century, October 19-22, Nagoya/JAPAN, (2005).
3. Günay M., Çiftçi I., Ateş H., Gül F., Şeker U., “A Review of Processing and Machinability of Particulate Reinforced Metal Matrix Composites, 4th International Conference on Powder Metallurgy, July 7-9, Sinaia/ROMANIA, (2005).
4. Günay M., Bahceci E., Seker U., Türker M., “Investigation of Mechanical Properties of Sic_p/Al-Si Composites Produced by Powder Metallurgy”, 5th International Powder Metallurgy Conference, October 8-12, Ankara/TURKEY(2008).
5. Günay M., Çiftçi I., Şeker U., “Evaluation of Cutting Tool Performance When Machining Sic_p/Al-Si Composites Produced by Powder Metallurgy”, 5th International Powder Metallurgy Conference, October 8-12, Ankara/TURKEY (2008).
6. Tekait İ., Günay M., Şeker U., “An Investigation Into the Effect of Cutting Tool Vibration on Surface Roughness in Turning Operations”, 5th International Advanced Technologies Symposium, May 13-15, Karabuk/TURKEY, (2009).
7. Korucu, S., Günay M., Kurt A., Şeker U., “Mathematical Modeling of Stress on the Cutting Tool in Drilling by Indexable Insert Drills”, 5th International Advanced Technologies Symposium, May 13-15, Karabuk/TURKEY, (2009).

Projeler

1. “Talaş Kaldırma İşlemlerinde Kesici Takımın Talaş Açısının Kesme Kuvvetleri Üzerindeki Etkisinin Sonlu Elemanlar Metodu Kullanılarak Deneysel Ve Analitik Olarak İncelenmesi”, **Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projesi**, Ankara.
Proje Kodu: 07 / 2002–14
Proje Yöneticisi: Yrd. Doç. Dr. Kurtuluş BORAN
Projedeki Görevi: Yardımcı Araştırmacı
2. “Talaş Kaldırmada Oluşan Kesme Kuvvetlerinin Sonlu Elemanlar Metodu Kullanılarak Deneysel ve Analitik Olarak İncelenmesi”, **Devlet Planlama Teşkilatı** (DPT), Ankara.
Proje Kodu: 2002 K120250–05
Proje Yöneticisi: Prof. Dr. Ulvi ŞEKER
Projedeki Görevi: Yardımcı Araştırmacı
3. “Nikel Esaslı Süper Alaşımlardan Inconel 718’in Özgül Kesme Direncinin Deneysel Olarak Belirlenmesi”, **Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projesi (BAP)**, Ankara.
Proje Kodu: 07/2003-16
Proje Yöneticisi: Prof. Dr. Ulvi ŞEKER
Projedeki Görevi: Yardımcı Araştırmacı
4. “AA2011-AA2024 Alüminyum Alaşımlarının İşlenmesinde Kesici Takım Talaş Açısının Kesme Kuvvetleri Üzerindeki Etkisinin Deneysel Olarak Araştırılması Ve Sonlu Elemanlar Metodu Kullanılarak Analizi”, **Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projesi (BAP)**, Ankara.
Proje Kodu: 07/2003-17
Proje Yöneticisi: Prof. Dr. Ulvi ŞEKER
Projedeki Görevi: Yardımcı Araştırmacı
5. “Parçacık Takviyeli Metal Matrisli Kompozit Malzemelerin Üretimi, Aşınma Davranışları, Fiziksel Ve Mekanik Özellikleri Ve İşlenebilirliğinin Araştırılması”, **Devlet Planlama Teşkilatı (DPT)**, Ankara.
Proje Kodu: 2003 K120470–19
Proje Yöneticisi: Prof. Dr. Ulvi ŞEKER
Projedeki Görevi: Yardımcı Araştırmacı
6. “Delik Tornalama Operasyonlarında Kesme Parametrelerinin Kesme Kuvvetlerine Ve İşlenebilirliğe Etkisinin Deneysel Olarak İncelenmesi”, **Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projesi (BAP)**, Ankara.
Proje Kodu: 07/2005–27
Proje Yöneticisi: Prof. Dr. Ulvi ŞEKER
Projedeki Görevi: Yardımcı Araştırmacı

7. “Tornalamada Talaş Kırıcı Geometrisinin Kesici Takım Gerilmelerine Etkisi”,
Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projesi (BAP), Ankara.
Proje Kodu: 07/2005–01
Proje Yöneticisi: Prof. Dr. Ulvi ŞEKER
Projedeki Görevi: Yardımcı Araştırmacı
8. “Kaynak Teknolojisindeki Gelişmeler”, **Leonardo da Vinci (LDV) Projesi**.
Proje Kodu :TR/04/A/F/EX1/028
Proje türü : Hareketlilik
Proje Yürütücüsü : Arş. Grv. Tayfun FINDIK
Tarih : 14 Ağustos / 04 Eylül 2005
Projedeki Görevi : Yararlanıcı
Yer : Stockholm, İSVEÇ

Hobiler

Futbol, Masa Tenisi, Voleybol, Yüzme, Seyahat etmek, Bilgisayar teknolojileri