

**ALÜMİNYUM ESASLI KOMPOZİTLERDE TAKVİYE ORANI VE
BOYUTUNUN MEKANİK ÖZELLİKLER VE İŞLENEBİLİRLİK ÜZERİNE
ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI**

133446

İbrahim ÇİFTÇİ

**DOKTORA TEZİ
(MAKİNA EĞİTİMİ)**

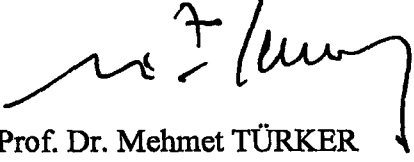
**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**Ekim 2003
ANKARA**

133446

**T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
BİLİMLER, ENJİNİNGERİ VE TEKNOLOJİ BAKANLIĞI**

İbrahim ÇİFTÇİ tarafından hazırlanan ALÜMİNYUM ESASLI KOMPOZİTLERDE
TAKVİYE ORANI VE BOYUTUNUN MEKANİK ÖZELLİKLER VE
İŞLENEBİLİRLİK ÜZERİNE ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI adlı bu tezin Doktora
tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.


Prof. Dr. Mehmet TÜRKER

Tez Yöneticisi

Bu çalışma, jürimiz tarafından Makina Eğitimi Anabilim Dalında Doktora Tezi
olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Prof. Dr. Muhammed Nalbant Çakallı
Üye : Prof. Dr. Mehmet TÜRKER (Danışman)
Üye : Prof. Dr. Ulvi ŞEKER
Üye : Yrd. Doç. Dr. Sait KÖKSAL
Üye : Yrd. Doç. Dr. Ferhat GÜL

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

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	iii
TEŞEKKÜR.....	v
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	vi
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	x
1. GİRİŞ.....	1
2. METAL MATRİSLİ KOMPOZİT MALZEMELER.....	4
2.1. Giriş.....	4
2.2. MMK malzemelerin sınıflandırılması.....	5
2.2.1. Sürekli elyaf takviyeli MMK malzemeler.....	5
2.2.2. Whisker ve kısa elyaf (sürekli) takviyeli MMK malzemeler.....	6
2.2.3. Parçacık takviyeli MMK malzemeler.....	6
2.3. MMK Malzemeler İçin Matris Malzemeleri.....	7
2.4. MMK Malzemeler İçin Takviye Elemanları.....	7
2.5. Matris – Takviye Elemanı Ara Yüzeyi ve Islanabilirlik.....	9
2.6. MMK Malzemelerde Dayanım Artırıcı Mekanizmalar.....	12
2.7. Parçacık Takviyeli Metal Matrisli Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemleri.....	15
2.7.1. Sıvı hal üretim yöntemleri.....	15
2.7.2. Katı hal üretim yöntemleri.....	19
2.7.3. Katı + sıvı hal üretim yöntemi.....	20

2.8. MMK Malzemeler ile İlgili Literatür Araştırması.....	20
2.8.1. Parçacık takviyeli MMK malzemelerin üretimi.....	20
2.8.2. Parçacık takviyeli MMK malzemelerin mekanik özellikleri.....	24
2.8.3. Literatür özeti.....	29
3. TALAŞLI İMALAT VE İŞLENEBİLİRLİK.....	31
3.1. Giriş.....	31
3.2. İşlenebilirlik.....	32
3.3. Talaşlı İmalat İşlemi.....	33
3.4. Talaşlı İmalat Mekanik ve Talaş Oluşumu.....	35
3.5. Takım-Talaş Ara Yüzeyi ve Yığıntı Talaş Oluşumu.....	37
3.6. Talaşlı İmalat İşleminde Kesme Kuvvetleri.....	38
3.7. Talaşlı İmalat İşleminde Isı ve Sıcaklık.....	40
3.8. Kesici Takım.....	41
3.8.1. Kesici takım geometrisi.....	41
3.8.2. Kesici takım malzemeleri.....	42
3.9. Takım Aşınması.....	47
3.10. İşlenebilirlikle ilgili Literatür Araştırması.....	49
3.10.1. Metal Matrisli Kompozit Malzemelerin İşlenebilirliği.....	49
3.11. Literatür Özeti.....	61
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	63
4.1. MMK Malzeme Üretiminde Kullanılan Matris Malzemesi ve Takviye Elemanı.....	63
4.2. Parçacık Takviyeli MMK Üretimi için Tasarlanan ve İmal Edilen Fırın Ünitesi.....	63
4.3. Parçacık Takviyeli MMK Malzemelerin Üretimi.....	64

4.4. Metalografik İncelemeler.....	66
4.5. Sertlik Ölçümleri.....	66
4.6. Çekme Deneyi.....	66
4.7. İşlenebilirlik Deneyleri.....	67
4.7.1. Kesici takımlar ve takım tutucular.....	67
4.7.2. Takım tezgahları.....	68
4.7.3. Deneyler.....	68
4.7.4. Takım mikroskobu, yüzey pürüzlülüğü ölçme cihazı ve tarama elektron mikroskobu (SEM).....	71
5. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA.....	72
5.1. Mikroyapı Fotoğrafları.....	72
5.2. Sertlik.....	75
5.3. Çekme Dayanımları.....	76
5.4. İşlenebilirlik Deneyleri.....	79
5.4.1. Kaplamasız ve kaplamalı sementit karbür kesici takımlar.....	79
5.4.2. Kübik bor nitrit kesici takımlar.....	93
5.4.3. CVD elmas kaplamalı sementit karbür kesici takımlar.....	103
5.5. MMK malzemelerin sertlikleri ve çekme dayanımları ile işlenebilirlikleri arasındaki ilişki.....	112
5.6. Genel Değerlendirme.....	113
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	117
KAYNAKLAR.....	121
ÖZGEÇMİŞ.....	129

**ALÜMİNYUM ESASLI KOMPOZİTLERDE TAKVİYE ORANI VE
BOYUTUNUN MEKANİK ÖZELLİKLER VE İŞLENEBİLİRLİK ÜZERİNE
ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI
(Doktora tezi)**

İbrahim ÇİFTÇİ

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Ekim 2003**

ÖZET

Bu araştırmada; sıvı metal karıştırma-basınçlı döküm yöntemiyle ortalama 30, 45 ve 110 μm boyutlu SiC parçacıklardan ağırlıkça % 8, 16 ve 32 oranlarında içeren 2014-Al esaslı metal matrisli kompozit (MMK) malzemeler üretilmiştir. Üretilen MMK malzemelerin mikroyapı ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Kaplamasız sementit karbür, kaplamalı sementit karbür, kübik bor nitrit (CBN) ve elmas kaplamalı sementit karbür kesici takımlar kullanılarak MMK malzemeler işlenebilirlik deneylerine tabi tutulmuştur. İşlenebilirlik deneyleri tornalama yöntemiyle, soğutma sıvısı kullanılmadan yapılmış ve işlenebilirlik kriterlerinden kesici takım aşınması ve iş parçası yüzey pürüzlülüğü incelenmiştir. Ayrıca, elmas kaplamalı sementit karbür kesici takımlarla işleme esnasında kesme kuvvetleri de ölçülmüştür. Deneyler farklı kesme hızları, sabit talaş derinliği ve sabit ilerleme hızında yapılmıştır. Artan parçacık oranı ve boyutu ile kullanılan bütün kesici takımlarda aşınma artmıştır. CBN kesici takımlar haricinde artan kesme hızıyla da kesici takım aşınması artmıştır. En yüksek aşınma direncini CBN kesici takımlar sergilemiştir. Elmas kaplamalı sementit karbürler diğer sementit karbürlerden daha iyi aşınma direnci gösterirken en düşük aşınma direncini de kaplamasız sementit karbürler göstermiştir. Kaplamasız ve kaplamalı sementit karbür kesici takımlarla elde edilen yüzeyler arasında bir karşılaştırma yapıldığında kaplamasız sementit

karbürlerin ortalama yüzey pürüzlülük değerine (R_a) göre özellikle düşük kesme hızlarında daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Kaplamalı sementit karbür kesici takımlarda daha kararlı bir yığıntı talaş oluştuğu ve bunun da daha yüksek R_a değerlerine sebep olduğu düşünülmüştür.

Aşınmış kesici takımlar optik ve tarama elektron mikroskoplarında (SEM) incelenerek aşınma biçimleri ve mekanizmaları belirlenmeye çalışılmıştır. Bütün kesici takımlarda etkin olan aşınma biçimi yan yüzey aşınması olmuştur. Kaplamasız ve kaplamalı sementit karbürlerde abrasif aşınma mekanizmasının etkili olduğu ve yüksek kesme hızlarında da ilave olarak kesici uçta kırılmalar görülmüştür. Elmas kaplamalı sementit karbürler ve CBN kesici takımlarda ise abrasif ve adhesiv aşınma mekanizmalarının birlikte etkili oldukları görülmüştür. Ayrıca, en büyük boyutlu parçacıklarla (110 μm) takviyeli MMK malzemenin CBN kesici takımla işlenmesinde kesici uçta yoğun bir şekilde kırılmalar görülmüştür.

Bilim Kodu : 708

Anahtar Kelimeler : Metal matrisli kompozit (MMK), sıvı metal karıştırma-basınçlı döküm yöntemi, işlenebilirlik, kesici takım aşınması, yüzey pürüzlülüğü

Sayfa Adedi : 129

Tez Yöneticisi : Prof. Dr. Mehmet TÜRKER

**INVESTIGATION OF REINFORCEMENT WEIGHT FRACTION AND SIZE
ON MECHANICAL PROPERTIES AND MACHINABILITY OF
ALUMINIUM BASED COMPOSITES**

(PhD Thesis)

İbrahim ÇİFTÇİ

**GAZI UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY**

October 2003

ABSTRACT

In this study; 2014-Al based metal matrix composites (MMCs) containing three levels of SiC particles (8, 16 and 32 wt %) of different mean particle sizes (30, 45 and 110 μm) were prepared using a melt stirring-squeeze casting route. Microstructural and mechanical properties of these composites were examined. These MMCs were subjected to machinability tests through single point continuous turning using uncoated cemented carbide, coated cemented carbide, cubic boron nitride (CBN) and diamond coated cemented carbide. The tests were performed dry and cutting tool wear and surface roughness criteria were investigated among the machinability criteria. In addition, cutting force measurements were also performed during machining using diamond coated cemented carbide tools. The tests were carried out at different cutting speeds while depth of cut and feed rate were kept constant. It is seen from the results that cutting tool wear increased with increasing SiC size and weight fraction for all the cutting tools used. Except for CBN cutting tools, tool wear also increased with increasing cutting speed. CBN cutting tools exhibited the highest wear resistance. Diamond coated cemented carbides showed better wear resistance than those of the other cemented carbides while uncoated carbide showed the worst wear resistance. When a comparison was made between the surfaces produced using uncoated and coated cemented carbide tools, it was seen that

uncoated cemented carbides produced better surface finishes in terms of R_a values, particularly at lower cutting speeds. This was explained by the presence of more stable built-up-edge (BUE), which causes poor surface finish, on the coated cemented carbides.

In order to determine tool wear modes and mechanisms, worn cutting tools were investigated using optical and scanning electron microscopes (SEM). SEM investigation revealed that tool flank wear was the dominant wear mode for all the cutting tools. In addition to abrasive wear mechanism, chipping particularly at high cutting speeds was found to be effective for uncoated and coated cemented carbide tools. Both abrasive and adhesive wear mechanisms were found to be effective for CBN and diamond coated cemented carbide cutting tools. Additionally, chipping of CBN cutting tools was observed when machining the MMC material containing particles of 110 μm in size.

Science code : 708

Key words : Metal matrix composite (MMC), melt stirring-squeeze casting method, machinability, cutting tool wear, surface roughness

Page number : 129

Adviser : Prof. Dr. Mehmet TÜRKER

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım süresince değerli yardım ve fedakarlıklarını esirgemeyen, bilgi ve tecrübesiyle beni yönlendiren değerli danışmanım Prof. Dr. Mehmet TÜRKER'e, Prof. Dr. Ulvi ŞEKER'e ve Yrd. Doç. Dr. Fehat GÜL'e, çalışmalarımın her aşamasında benden yardımlarını esirgemeyen Prof. Dr. Muammer NALBANT'a, Prof. Dr. Mahmut GÜLESİN'e, Doç. Dr. Serdar YÜCESU'ya, Yrd. Doç. Dr. Çetin KARATAŞ'a, Yrd. Doç. Dr. Abdulkadir GÜLLÜ'ye, fırının imalatı ve malzeme üretimi esnasında yardımlarını esirgemeyen Arş. Gör. Gökhan SUR'a, Arş. Gör. Halil DEMİR'e, Arş. Gör. Nizamettin KAHRAMAN'a, Arş. Gör. Ahmet DURGUTLU'ya ve mezun olan lisans öğrencileri Gazi BÜYÜKTAŞ ve Mehmet Ali ÇINAR'a, işlenebilirlik deneyleri esnasında yardımcı olan Arş. Gör. Yakup TURGUT'a, Arş. Gör. Abdullah KURT'a ve Arş. Gör. Mustafa GÜNAY'a ve Arş. Gör. Yakup YILDIZ'a teşekkürü bir borç bilirim.

Benim eğitimim boyunca desteğini esirgemeyen anneme, babama ve kardeşlerime teşekkür ederim. Ayrıca, yapılan bu çalışmanın her aşamasında sabır ve desteğiyle yanımda olan eşim Hilal'e teşekkür ederim.

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Toz metalurjisi ve XD yöntemiyle üretilen MMK malzemelerin mekanik özellikleri (60).....	29
Çizelge 4.1. 2014-Al alaşımının kimyasal bileşimi.....	63
Çizelge 4.2. Üretilen MMK malzemeler.....	65
Çizelge 4.3. Kesici takımların kodları, kaplamaları ve üretici firmaları.....	68
Çizelge 5.1. Brinell sertlik değerleri.....	76
Çizelge 5.2. Kaplamasız ve kaplamalı sementit karbür kesici takımlarda kaldırılan talaş hacmi ve yan yüzey aşınması.....	84
Çizelge 5.3. Kaplamasız (Hti10) ve kaplamalı (UC5005) sementit karbür kesici takımlarla edilen ortalama yüzey pürüzlülük (R_a) değerleri.....	91

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Takviye elemanına göre üç tür MMK malzemenin şematik gösterilişi (7).....	6
Şekil 2.2. Katı, sıvı ve gaz fazları arasında oluşan temas açılarının şematik gösterilişi (24).....	10
Şekil 2.3 Farklı hacim oranlarında Al_2O_3 parçacık içeren 2024-Al alaşımı matrisli kompozit malzemelerin mikroyapıları (20).....	14
Şekil 3.1. Torna tezgahı ve tornalama işleminin şematik olarak gösterimi (66).....	35
Şekil 3.2. Dik kesme modeli (14).....	36
Şekil 3.3. Gerçek talaş oluşumu (14).....	37
Şekil 3.4. Tornalama işleminde kesme kuvvetleri (15).....	39
Şekil 3.5. Kesme bölgesinde ısı oluşumu (61).....	40
Şekil 3.6. Sağ yönlü kesme işlemi yapan, sağ yan kesici takım (69).....	42
Şekil 3.7. Kesici takımdaki aşınmaların şematik olarak gösterilmesi (14).....	48
Şekil 4.1. MMK malzeme üretim ünitesinin şematik olarak gösterilmesi.....	64
Şekil 4.2. Çekme deney numunesi.....	67
Şekil 4.3. Al-%8 SiC/45 MMK malzemenin CVD elmas kaplamalı sementit karbür kesici takımla 25 m/min kesme hızında işlenmesi esnasında oluşan kesme kuvvetleri.....	70
Şekil 4.4. Al-%8 SiC/45 MMK malzemenin CVD elmas kaplamalı sementit karbür kesici takımla 50 m/min kesme hızında işlenmesi esnasında oluşan kesme kuvvetleri.....	71
Şekil 5.1. MMK malzemelerin mikroyapı fotoğrafları, a) Al-%8 SiC/30, b) Al-%16 SiC/30 ve c) Al-%32 SiC/30.....	72
Şekil 5.2. MMK malzemelerin mikroyapı fotoğrafları, a) Al-%8 SiC/45, b) Al-%16 SiC/45 ve c) Al-%32 SiC/45.....	73
Şekil 5.3. MMK malzemelerin mikroyapı fotoğrafları, a) Al-%8 SiC/110, b) Al-%16 SiC/110 ve c) Al-%32 SiC/110.....	74

Şekil 5.4. Matris – takviye elemanı arayüzeyi a) Al-%8 SiC/30 ve b) Al-%8 SiC/110.....	75
Şekil 5.5. Matris ve 30 µm SiC parçacıklar içeren MMK malzemelerin çekme dayanımları (UTS).....	77
Şekil 5.6. Al-%8 SiC/30 MMK malzemenin kırılma yüzeyi.....	78
Şekil 5.7. Al-%32 SiC/30 MMK malzemenin kırılma yüzeyi.....	79
Şekil 5.8. 1250 mm ³ talaş kaldırma işleminden sonra kaplamasız sementit karbür kesici takımlarda oluşan yan yüzey aşınmaları.....	81
Şekil 5.9. 1250 mm ³ talaş kaldırma işleminden sonra kaplamalı sementit karbür kesici takımlarda oluşan yan yüzey aşınmaları.....	81
Şekil 5.10. Al-%8 SiC/45 MMK malzemenin kaplamasız ve kaplamalı sementit karbür kesici takımlarla işlenmesi sonucu oluşan yan yüzey aşınmaları.....	82
Şekil 5.11. 625 mm ³ talaş kaldırma işleminden sonra kaplamasız sementit karbür kesici takımlarda oluşan yan yüzey aşınmaları.....	83
Şekil 5.12. 625 mm ³ talaş kaldırma işleminden sonra kaplamalı sementit kesici takımlarda oluşan yan yüzey aşınmaları.....	83
Şekil 5.13. Al-%8 SiC/45 MMK malzemenin 20 m/min kesme hızında kaplamasız sementit karbür kesici takımla işlenmesi sonucu kesici takımında oluşan yan yüzey ve krater aşınmaları.....	86
Şekil 5.14. Al-%16 SiC/30 MMK malzemenin 20 m/min kesme hızında kaplamasız sementit karbür kesici takımla işlenmesi sonucu kesici takımında gerçekleşen üç-gövdeli abrasif aşınma mekanizması...	87
Şekil 5.15. Al-%8 SiC/45 MMK malzemenin kaplamalı sementit karbür kesici takımla a) 20 m/min ve b) 80 m/min kesme hızlarında işlenmesi sonucu oluşan kesici takım aşınmaları.....	89
Şekil 5.16. Al-%8 SiC/45 MMK malzemenin kaplamasız sementit karbür kesici takımla a) 20 m/min ve b) 80 m/min kesme hızlarında işlenmesi sonucu oluşan kesici takım aşınmaları.....	90
Şekil 5.17. CBN kesici takımlarda yan yüzey aşınmaları.....	93
Şekil 5.18. Al-%16 SiC/110 MMK malzemenin CBN kesici takımla a) 50 m/min ve b) 100 m/min kesme hızlarında işlenmesi sonucu kesici takımında oluşan kırılmalar.....	95

Şekil 5.19. Al-%16 SiC/45 MMK malzemenin CBN kesici takımla 100 m/min kesme hızında işlenmesi sonucu kesici takımın aşınan bölgelerine sıvıyan iş parçası malzemesi	97
Şekil 5.20. Al-%16 SiC/30 MMK malzemenin CBN kesici takımla a) 100 m/min ve b) 150 m/min kesme hızlarında işlenmesi sonucu kesici takım üzerinde oluşan yığıntı talaşlar.....	99
Şekil 5.21. Al-%16 SiC/45 MMK malzemenin CBN kesici takımla a) 100 m/min ve b) 150 m/min kesme hızlarında işlenmesi sonucu kesici takım üzerinde oluşan yığıntı talaşlar.....	100
Şekil 5.22. Al-%16 SiC/30 MMK malzemenin CBN kesici takımla 200 m/min kesme hızında işlenmesi sonucu kesici takımda oluşan aşınma.....	101
Şekil 5.23. Şekil 5.22'deki dikdörtgen alanın daha ayrıntılı olarak gösterilmesi.....	101
Şekil 5.24. CBN kesici takımlarla elde edilen ortalama yüzey pürüzlülük (R_a) değerleri.....	103
Şekil 5.25. CVD elmas kaplamalı sementit karbür kesici takımlarda oluşan yan yüzey aşınmalar.....	104
Şekil 5.26. CVD elmas kaplamalı sementit karbür kesici takımlarla işleme esnasında oluşan talaşların parçacık oranı ve kesme hızına bağlı olarak kıvrılma yarıçapları.....	105
Şekil 5.27. Al-%8 SiC/30 MMK malzemenin 25 m/min kesme hızında işlenmesi sonucu CVD elmas kaplamalı sementit karbür kesici takımın kesici ucunda kaplamanın tamamen aşınması.....	106
Şekil 5.28. Al-%8 SiC/45 MMK malzemenin 25 m/min kesme hızında işlenmesi sonucu CVD elmas kaplamalı sementit karbür kesici takımdaki yan yüzey aşınması.....	107
Şekil 5.29. Al-%16 SiC/45 MMK malzemenin CVD elmas kaplamalı sementit karbür kesici takımla a) 25 ve b) 125 m/min kesme hızlarında işlenmesi sonucu kesici takımda oluşan aşınmalar.....	109
Şekil 5.30. CVD elmas kaplamalı sementit karbür kesici takımlarla elde edilen ortalama yüzey pürüzlülük (R_a) değerleri.....	110
Şekil 5.31. CVD elmas kaplamalı sementit karbür kesici takımlarla işleme esnasında oluşan esas kesme kuvvetleri.....	112

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklama
ε	Matris ve takviye elemanı arasındaki uyumsuzluk deformasyonu
$\Delta\alpha$	Matris ve takviye elemanlarının ısı genleşme katsayıları arasındaki fark
ΔT	Sıcaklık değişimi
θ	Islanabilirlik açısı
$\gamma_{sl}, \gamma_{sg}, \gamma_{lg}$	Sırasıyla katı - sıvı, katı - gaz ve sıvı - gaz fazları arasındaki arayüzey enerjileri
Y	Akma dayanımı
Y_i	Dislokasyonların hareketlerini engelleyen temel akma dayanımı
K	Tane sınırları gibi engellerde dislokasyon yığılmasının boyutunu gösteren sabit
D	Tane çapı
E	Elastiklik Modülü
V	Kesme hızı
F	İlerleme hızı
A	Talaş derinliği
W	İş parçası genişliği
L_s	Kayma düzlemi uzunluğu
ϕ	Kayma düzlemi açısı
α	Kesici takım talaş açısı
F	Bileşke kuvvet
F_c	Esas kesme kuvveti

Simgeler	Açıklama
F_f	İlerleme kuvveti
F_r	Radyal kuvvet
V_b	Yan yüzey aşınma bandı genişliği
R_a	Ortalama yüzey pürüzlülük değeri
R	Kesici takım uç yarı çapı

Kısaltmalar

MMK	Metal matrisli kompozit
PCD	Çok kristalli elmas (polycrystalline diamond)
2014-Al	Alüminyum alaşımı
SEM	Tarama elektron mikroskobu (scanning electron microscope)
CBN	Kübik bor nitrit (cubic boron nitride)
CTE	Isıl genleşme katsayısı (coefficient of thermal expansion)
HIP	Sıcak izostatik presleme (hot isostatic pressing)
VSD	Vickers sertlik değeri
BUE	Yığıntı talaş (built-up-edge)
CVD	Kimyasal buhar çökeltme (chemical vapour deposition)
PVD	Fiziksel buhar çökeltme (physical vapour deposition)
HSS	Yüksek hız çeliği (high speed steel)
SiC_p	Silisyum karbür parçacık
BSD	Brinell sertlik değeri
UTS	Çekme dayanımı (ultimate tensile strength)

1. GİRİŞ

Malzeme bilimi alanında normal ve yüksek sıcaklıklarda yüksek özgül dayanım ve yüksek elastikiyet modülüne sahip, sürünme ve yorulma direnci iyi olan ve yüksek aşınma direnci sergileyen hafif malzemelerin geliştirilmesi için çok sayıda çalışma yapılmıştır. Otomotiv, elektronik, spor, havacılık ve uzay gibi endüstri dallarında performansın artırılması için bu özellikler gereklidir. Günümüzde, bu özellikleri alüminyum ve magnezyum alaşımları gibi hafif geleneksel malzemelerden elde etmek mümkün görülmemektedir. Bununla birlikte, “Metal Matrisli Kompozit” (MMK) malzemelerin performansta önemli derecede artış sağlama potansiyeline sahip olduğu görülmüştür (1,2).

MMK malzemeler genelde alüminyum, magnezyum ve titanyum gibi hafif matris malzemelerine uzun veya kısa elyaf, whisker veya parçacık biçiminde SiC veya Al_2O_3 gibi seramik malzemelerin takviye elemanları olarak çeşitli yöntemlerle katılmasıyla üretilirler. Farklı özelliklere sahip malzemelerin bir araya getirilmesiyle elde edilen MMK malzemeler, seramiklerin yüksek dayanım ve metallerin yüksek tokluk ve süneklik özelliklerini bir arada taşırlar (3). MMK malzemelerin geliştirilmesi 1960’lı yıllarda bor, grafit ve aramid elyafların üretilmesiyle başlamıştır (4). MMK malzemeler başlangıçta havacılık ve savunma endüstrilerinde yüksek performanslı ürünlerin üretilmesinde kullanılmıştır. Bu gibi uygulama alanlarında öncelikle performans artışı üzerinde durulmuş ve maliyet ikinci planda tutulmuştur. Bu tür malzemelerin üretimi, uzun elyaf takviye elemanları kullanıldığı ve üretim yöntemleri yoğun işçilik gerektirdiği için yüksek maliyeti beraberinde getirmiştir ve bu sebeple kullanımları çok özel uygulama alanları ile sınırlandırılmıştır. Daha sonraki yıllarda oldukça ucuz takviye elemanlarının (özellikle parçacık) temin edilebilmesi ve daha az işçilik ve maliyet gerektiren üretim yöntemlerinin kullanılmasıyla maliyeti oldukça düşük MMK malzemeler üretilerek ticari anlamda kullanılmaları mümkün olmuştur (1,5). Uzun elyaf takviyeli MMK malzemelerle elde edilen özellikler kısa elyaf takviyeli MMK malzemelerle elde edilememesine rağmen, kısa elyaf takviyeli MMK malzemelerin özelliklerinde matris malzemesine göre önemli oranda iyileşme görülmüştür. Bu özellikleri

nedeniyle otomotiv sanayinde fren diskleri ve güç aktarma milleri, havacılık sanayinde elektrik teçhizatları için sehpa, spor sanayinde bisiklet gövdeleri ve elektronik sanayinde elektronik mikrodevreler için altlıklar gibi endüstriyel ürünler parçacık takviyeli MMK malzemelerden üretilerek endüstriyel kullanımları yaygınlaşmıştır (5-7). Aynı zamanda parçacık takviyeli MMK malzemeler uzun elyaf takviyeli MMK malzemelere göre daha izotropik özelliklere sahiptirler.

Parçacık takviyeli MMK malzemelerin üretiminde geleneksel olarak toz metalurjisi yöntemi kullanılmıştır (8,9). Toz metalurjisi yönteminin maliyetinin nispeten yüksek olması ve üretilen parça boyutlarının küçük olması araştırmacıları, parçacık takviyeli MMK malzemelerin üretilmesi için, daha ekonomik yöntemlerin araştırılmasına yöneltmiştir. Sıvı metal karıştırma (döküm) yönteminin düşük maliyetli üretim için iyi bir potansiyele sahip olduğu görülmüş ve bu yöntem günümüzde endüstriyel seviyede parçacık takviyeli MMK malzeme üretmek için kullanılmaktadır (10). Üretilen MMK malzemelerin kalitelerini artırmak için son yıllarda sıvı metal karıştırma-basınçlı döküm yöntemiyle üretim gündeme gelmiştir. Yapılan değişik çalışmalar basınçlı döküm tekniğinin MMK malzemelerin özelliklerini önemli derecede iyileştirdiğini göstermektedir (11).

Kısa elyaf takviyeli ve özellikle parçacık takviyeli MMK malzemelerin, geleneksel metal alaşımlarına göre üstün özellikleri nedeniyle, imalatçıların ilgisini çekmekle birlikte bu malzemelerin yaygın olarak kullanılmalarının önünde iki önemli engel vardır. Bunlardan birincisi üretimlerinde karşılaşılan problemler ve ikincisi de üretimleri sonrası kullanıma hazır hale getirmek için talaşlı imalat maliyetlerinin yüksek olmasıdır (2). Seramiklerin metallerle ıslanmama eğilimi, homojen olmayan parçacık dağılımı ve özellikleri kötüleştirici arayüzey reaksiyonları sıvı metal karıştırma yöntemiyle MMK üretiminde karşılaşılan başlıca problemlerdir. Bu problemlerin giderilip başarılı bir şekilde MMK malzeme üretimi için üretim parametrelerinin iyi seçilmesi gerekmektedir. MMK malzemelerin üretilmelerinden sonra kullanıma hazır hale gelmeleri ve belirli bir yüzey kalitesine sahip olmaları için talaşlı imalatları esnasında karşılaşılan en önemli problem ise hızlı kesici takım aşınmasıdır. MMK malzemelerin içerisindeki SiC ve Al₂O₃ gibi takviye elamanları

çeşitli kesici takımların ana maddesidir ve metal kesme işleminde yaygın olarak kullanılan sementit karbür kesici takımlardan daha serttir. Bazı araştırmacılar MMK malzemeleri düşük konsantrasyonlu taşlama taşına benzeterek (5) bu malzemelerin talaşlı imalatlarındaki güçlüğü dikkat çekmişlerdir. Bu problemler nedeniyle MMK malzemelerin talaşlı imalatlarında çok pahalı olan Çok Kristalli Elmas (polycrystalline diamond – PCD) kesici takımlar endüstriyel olarak kabul edilebilir takım ömrü sağlamakla birlikte sementit karbür kesici takımların da düşük kesme hızları ve yüksek ilerleme hızlarında kabul edilebilir takım ömrü sağlayabileceği rapor edilmiştir (12).

Bu çalışmada, basınçlı döküm yöntemiyle parçacık takviyeli MMK malzemeler üretmek için bir fırın tasarlanıp imal edilmiştir. Fırının tasarlanıp imal edilmesi bu çalışmaya paralel bir çalışmayla birlikte yapılmıştır (13). Matris malzemesi olarak 2014-Al alaşımı kullanılmıştır. Basınçlı döküm tekniği ile ağırlıkça % 8, 16 ve 32 oranlarında ortalama 30, 45 ve 110 μm boyutlarında yeşil SiC parçacıklar kullanılarak dokuz farklı 2014-Al matrisli MMK malzeme üretilmiştir. Üretilen MMK malzemelerin mikroyapılarından parçacık dağılımı ve SiC parçacık ile matris arasındaki birleşme incelenmiştir. Sertlik ve çekme dayanımı gibi çeşitli özellikleri yapılan deneylerle belirlenmiştir. Çekme deneyine tabi tutulan numunelerin kırılma yüzeyleri tarama elektron mikroskopunda (SEM) incelenerek kırılma davranışları belirlenmiştir. Kaplamasız sementit karbür, kaplamalı sementit karbür, CVD elmas kaplamalı sementit karbür ve kübik bor nitrit (cubic boron nitride – CBN) kesici takımlar olmak üzere dört farklı kesici takım kullanılarak, üretilen bu numuneler işlenebilirlik deneylerine tabi tutulmuştur. İşlenebilirlik deneyleri soğutma sıvısı kullanılmadan kuru çalışma şartlarında gerçekleştirilmiştir. İlerleme hızı ve talaş derinliği bütün deneylerde sabit tutulmuş ve kesme hızı, parçacık ağırlık oranı ve parçacık büyüklüğünün takım aşınması ve yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkileri incelenmiştir. Ayrıca, elmas kaplamalı kesici takımlarla işleme esnasında kesme kuvvetleri de ölçülmüştür. Kesici takımlardaki aşınma mekanizmalarını görebilmek için SEM ile aşınan kesici uçlar incelenmiştir.

2. METAL MATRİSLİ KOMPOZİT MALZEMELER

2.1. Giriş

Metal, seramik ve polimer malzemelere ilave olarak kompozit malzemeler de ayrı bir grup mühendislik malzemesi olarak tanımlanabilir. Diğer üç grup malzemeye göre yapıları daha karmaşık olan kompozit malzemeler için genel olarak kabul görmüş bir tanım mevcut değildir. Bununla birlikte, özellikleri farklı iki veya daha fazla malzemenin mekanik veya metalurjik olarak bir araya getirilmesiyle elde edilen malzemeler şeklinde tanımlanmaktadır (14,15). Elde edilen bu malzemelerin özellikleri bileşenlerin özelliklerine benzetmekle birlikte tamamen aynı değildir. Örnek olarak, alüminyuma SiC parçacık katılmasıyla elde edilen kompozit malzemenin alüminyuma göre elastikiyet modülü, dayanımı, sertliği vb. gibi özellikleri iyileşirken tokluğu azalır. Benzer şekilde, SiC parçacık ile üretilen kompozit malzeme karşılaştırıldığında, SiC parçacığa göre üretilen kompozit malzemenin sertlik ve dayanımı azalırken tokluğu artar. Kompozit malzemeler matris malzemelerine göre polimer, seramik ve metal matrisli kompozit malzemeler olarak üç gruba ayrılır.

Metal matrisli kompozit (MMK) malzemeler, seramiklerin yüksek dayanım ve metallerin yüksek tokluk özelliklerine sahiptirler. Yüksek özgül dayanım, yüksek özgül rijitlik ve yüksek sıcaklıktaki iyi mekanik özellikler ve seramiklere göre yüksek tokluk sergilemenin yanında, MMK malzemeler çoğunlukla iyi aşınma ve sürtünme direncine sahiptirler. MMK malzemelerin geliştirilmesinde uzay ve havacılık sanayi önemli bir rol oynamakla birlikte, otomotiv ve spor gibi diğer endüstri dallarında kalitenin artırılmasına yönelik yapılan çalışmalar MMK malzemelerin kullanımının bu alanlarda da kabul görmesine yol açmıştır (3).

Otomotiv, uzay/havacılık, demiryolu taşıma sistemleri ve spor alanlarında artan performans gereksinimlerinin karşılanabilmesi için çelik ve dökme demir malzemelerin yerini MMK malzemeler gibi hafif ve yüksek dayanımlı malzemeler almaktadır. Özellikle, otomotiv endüstrisinde hafif oluşları, yakıt tasarrufu sağlaması

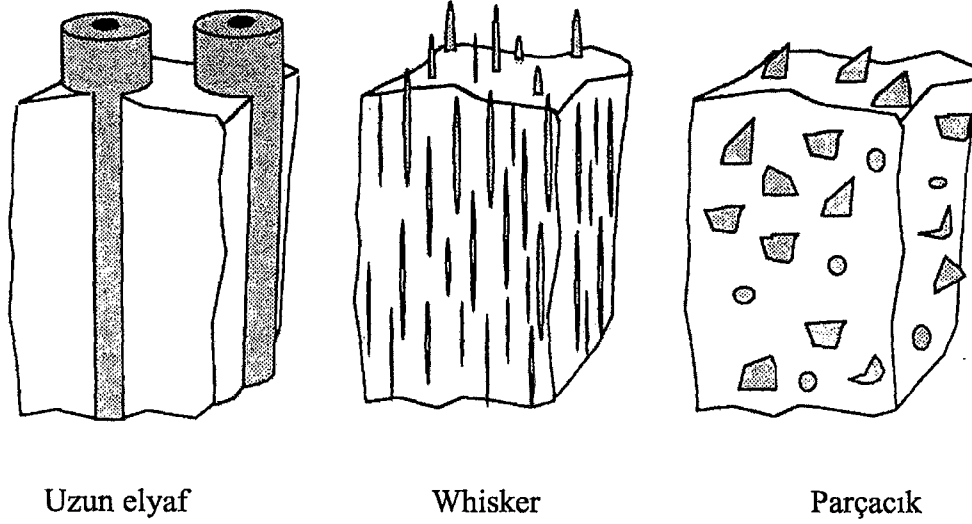
ve dolayısıyla çevreye daha az emisyon yayılması nedeniyle bu malzemeler imalatçılar tarafından büyük ilgi görmektedir (16). Bu gibi avantajlarından dolayı kullanımlarının yıllık % 12 – 15 arasında artmakta olduğu rapor edilmiştir (17).

2.2. MMK Malzemelerin Sınıflandırılması

MMK malzemelerin, takviye elemanlarına göre değişik şekillerde sınıflandırılmaları mümkündür. Sürekli ve süreksiz takviyeli olarak iki gruba ayrılabilirken, uzun elyaf, kısa elyaf/whisker ve parçacık takviyeli olmak üzere üç gruba da ayrılabilirler. Şekil 2.1 değişik takviye elemanlarına sahip MMK malzemelerin sınıflandırılmasını şematik olarak göstermektedir.

2.2.1. Sürekli elyaf takviyeli MMK malzemeler

Bu kompozitlerde, genellikle 0,1 – 250 μm çaplarında elyaflar kullanılır. Sıvı metal infiltrasyonu ve difüzyon birleştirmesi (bonding) yöntemleriyle üretilirler. Üretilmeleri otomasyonu zor olan bir çok aşama gerektirir ve elyaf maliyeti oldukça yüksektir. Dolayısıyla, bu malzemelerin üretim maliyetleri hala yüksektir (18). Sürekli elyaf takviyeli MMK malzemeler, takviye elemanına paralel yönde mükemmel mekanik özelliklere sahip olmalarına rağmen bu malzemelerin yüksek maliyeti yaygın olarak kullanılmalarını engellemektedir. Ayrıca, sürekli elyaf takviyeli MMK malzemeler elyaf eksenine dik yönlerde anizotropik özelliklere sahiptirler. Sürekli elyaf takviyeli MMK malzemelerin kullanılmaları yüksek maliyetleri nedeniyle, çoğunlukla askeri ve çok özel amaçlı uygulamalarla sınırlandırılmıştır (3).



Şekil 2.1. Takviye elemanına göre üç tür MMK malzemenin şematik gösterilişi (7)

2.2.2. Whisker ve kısa elyaf (süreksiz) takviyeli MMK malzemeler

Bu tür MMK malzemelerde kullanılan takviye elemanları kısa elyaflar veya tek kristalli whiskerlerdir. Yapılarında hemen hemen kristal hataları olmayan whiskerlerin akma dayanımları teorik dayanımlarına yakındır (19). Bu nedenle, yüksek dayanımlı süreksiz takviyeli MMK malzeme üretmek için kullanılmıştır (1). Özellikle, whiskerin yüksek sıcaklıktaki özellikleri diğer elyaflardan iyi olduğu için whiskerlerle takviyeli MMK malzeme üretimi için çok sayıda çalışma yapılmıştır. Whiskerlerin çap-uzunluk ($l/d \approx 50-100$) oranlarının yük transferine müsaade etmesi de diğer avantajlarıdır. Silisyum karbür whisker takviyeli alüminyum MMK malzemeler uzay araçlarında yaygın olarak kullanılmıştır. Bununla birlikte, whiskerlere olan bu yoğun ilgi sağlıkla ilgili problemler oluşturduğu için azalmıştır (3,19).

2.2.3. Parçacık takviyeli MMK malzemeler

Otomotiv parçalarının üretiminde parçacık takviyeli MMK malzemelerin performansı artırmak için büyük bir potansiyele sahip olduğu görülmüştür. Geleneksel matris malzemesine göre parçacık takviyeli MMK malzemelerin

dayanımı ve rijitliğinde önemli derecede artış görülür. Yapılan bir çalışmada % 20 oranında silisyum karbür parçacığının üretilen MMK malzemenin akma ve çekme dayanımını yaklaşık olarak aynı oranda artırdığı belirtilmiştir. Yoğunlukta fazla bir değişme olmazken, rijitlikte % 50 bir artış olmuştur (19). Parçacık maliyetinin elyaf maliyetine göre oldukça düşük olması, parçacık takviyeli MMK malzemelerin uzun elyaf takviyeli malzemelerden daha kolay üretilibilmeleri ve üretilen MMK malzemelerin daha izotropik bir yapıya sahip olmaları nedeniyle, son yıllarda yapılan çalışmalar genel amaçlı kullanımlar için parçacık takviyeli MMK malzemelerin geliştirilmesi üzerinde yoğunlaşmıştır (18,20).

SiC takviyeli alüminyum matrisli kompozit malzemeler aşınma direnci gerektiren uygulama alanlarında kullanım için büyük bir potansiyele sahiptirler. Parçacıklar, sertlik ve aşınma direncini önemli oranlarda iyileştirirler (19).

2.3. MMK Malzemeler İçin Matris Malzemeleri

Kompozit malzemeler matris ve takviye fazlarından oluşur. Metal matris birleştirici olarak görev yapar ve esas fonksiyonu yükü takviye elemanlarına iletip dağıtmasıdır. Matris seçiminde oksidasyon ve korozyon direnci ile birlikte diğer bazı faktörler göz önünde bulundurulur. Al, Ti, Mg, Ni, Cu, Pb, Fe, Ag, Zn, Sn ve Si matris malzemesi olarak kullanılmakla birlikte en yaygın olarak kullanılanları Al, Ti ve Mg'dur. İyi korozyon direnci, düşük yoğunluğu, yüksek ısıl iletkenliği ve nispeten iyi mekanik özelliklere sahip olduğu için günümüzde yapılan çalışmalar alüminyum alaşımları üzerinde yoğunlaşmıştır. 2xxx, 6xxx ve 7xxx alüminyum alaşımları MMK malzeme üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır (3,19).

2.4. MMK Malzemeler İçin Takviye Elemanları

Oda sıcaklığında ve yüksek sıcaklıklarda yüksek dayanım ve rijitlik özellikleri sergilemelerinden dolayı takviye elemanı olarak genellikle seramikler kullanılır. Bu seramikler oksitler, karbürler ve nitrürlerden oluşur. Yaygın olarak kullanılan takviye

elemanları SiC, Al₂O₃, TiB₂, bor ve grafitir (19). Takviye elemanı seçiminde dikkate alınması gereken hususlar:

- elastikiyet modülü,
- çekme dayanımı,
- yoğunluk,
- ergime sıcaklığı,
- kimyasal kararlılık,
- ısı genleşme katsayısı,
- boyut ve şekil,
- matris malzemesiyle uyumluluk, ve
- maliyet

şeklinde sıralanabilir (3).

Süreksiz takviyeli MMK malzemelerin yapısal etkinliği takviye fazlarının yoğunluğunun, elastiklik modülünün ve çekme dayanımının bir fonksiyonudur. Takviye elemanının matris malzemesiyle kimyasal kararlılığı ve uyumluluğu MMK malzemelerin hem üretimleri esnasında ve hem de kullanımları esnasında önemlidir. Matris ve takviye elemanı arasındaki uyumsuzluk deformasyonu (mismatch strain), ε , kullanımları esnasında ısı değişimlere maruz kalacak kompozitler için önemli bir faktördür. Eşitlik 1'e göre, ε , matris ve takviye elemanlarının ısı genleşme katsayıları arasındaki farkın, $\Delta\alpha$, bir fonksiyonudur:

$$\varepsilon = \Delta\alpha\Delta T \quad [2.1]$$

Burada, ΔT sıcaklık değişimidir. Deformasyon birikimini (strain accumulation) azaltmak için $\Delta\alpha$ 'nın azaltılması gerekir (3).

2.5. Matris – Takviye Elemanı Arayüzeyi ve Islanabilirlik

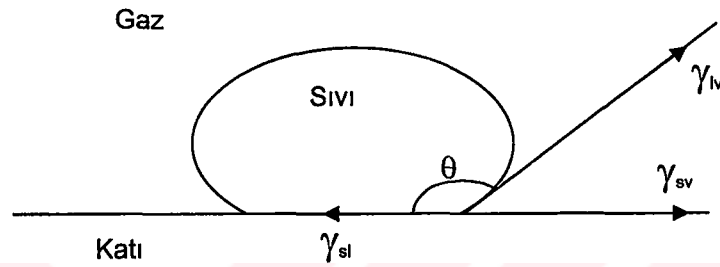
Matris ve takviye elemanı arasındaki arayüzey bağının özellikleri üretilen kompozit malzemenin mekanik ve fiziksel özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olup deformasyon esnasında yük transferini ve kırılma direncini belirlediği için önemlidir. MMK malzemelerde arayüzey dayanımını artırmak için ıslanabilirliğin iyileştirilmesi, kimyasal reaksiyonların kontrolü ve oksit oluşumunun azaltılması gerekir (3,21).

MMK malzeme üretiminde alüminyum ve alaşımları en çok kullanılan matris malzemelerinden biri olduğu için, alüminyum ve alaşımları ile seramiklerin ıslanabilirliğini inceleyen çok sayıda çalışma yapılmıştır. Yapılan çalışmalardan 950° C sıcaklığın altında alüminyumun çoğu seramiklerle ıslanmama eğiliminde olduğu görülmüştür (22). Ergimiş metal-seramik sistemlerinde ıslanabilirlik problemleri çoğunlukla ergimiş metallerin yüksek yüzey geriliminden kaynaklanır. Örnek olarak, 950 °C'un altındaki sıcaklıklarda karbon, SiC, B₄C ve Al₂O₃ alüminyumla ıslanmama eğilimi gösterir. Ayrıca, takviye elemanlarının genelde yüzeyleri gaz katmanı (23) ile kaplanır. Bu durum ergimiş matris malzemesinin takviye elemanı yüzeyi ile temasını engeller. Özellikle, parçacıklar açık atmosferden ergimiş metal içerisine transfer edilirken, parçacıklar üzerinde tutulan gaz, parçacıkların sıvı metalle ıslanmasını engeller. Başarılı bir şekilde kompozit malzeme üretmek için bu problemlerin aşılması ıslanabilirliğin iyileştirilmesi gerekmektedir (3,16).

Islanabilirlik, bir sıvının bir katı yüzeye dağılma kabiliyeti olarak tanımlanabilir. Bir seramik ve bir sıvı arasındaki ıslanabilirlik, sıvının yüzey enerjisi aşıldığında gerçekleşir. Islanabilirlik, katı ve sıvı arasındaki temas açısı ölçülerek (Şekil 2.2) Young Dupré eşitliğiyle belirlenir.

$$\cos \theta = \frac{\gamma_{sg} - \gamma_{sl}}{\gamma_{lg}} \quad [2.2]$$

Burada, γ_{sl} , γ_{sg} ve γ_{lg} sırasıyla katı - sıvı, katı - gaz ve sıvı - gaz fazları arasındaki arayüzey enerjileridir. Temas açılarının büyüklüğü Şekil 2.2’de gösterildiği gibidir. θ , 0° iken mükemmel ıslanma, θ , 180° iken ıslanmama ve θ , 0° ile 180° arasında ise kısmen ıslanma gerçekleşir (24).



Şekil 2.2. Katı, sıvı ve gaz fazları arasında oluşan temas açılarının şematik gösterilişi (24)

Metal-seramik arayüzeylerinin sistematik olarak incelenmesine 1960’lı yılların başlarında başlanmıştır. Seramik takviye elemanlarının ergimiş metalle ıslanabilirliğini iyileştirmek için çeşitli yaklaşımlar benimsenmiştir. Esas olan temas açısının (θ) azaltılmasıdır. Temas açısının azaltılması,

- a) katının yüzey enerjisi artırılarak,
- b) katı-sıvı arayüzey enerjisi azaltılarak ve/veya,
- c) sıvının arayüzey enerjisi azaltılarak

gerçekleştirilir.

Pratikte, temas açısının azalması:

- a) seramik parçacıklara metalik kaplamalar uygulayarak,
- b) matris malzemesini reaktif elementlerle alaşımlayarak ve,
- c) seramik parçacıkları ısıtılmalara tabi tutarak

sağlanır (3).

Seramik parçacıklara nikel ve bakır gibi metalik kaplamaların uygulanması metal-seramikten metal-metale olan arayüzeyin doğasını değiştirerek parçacıkların toplam yüzey enerjilerini artırır. Böylelikle, parçacık ve matris arasında kuvvetli bir etkileşimle ıslanma sağlanır. Bu yaklaşım, örnek olarak, Al-Al₂O₃ sisteminde Al₂O₃'ün Ni ve Ti-Ni ile kaplanmasıyla başarılı bir şekilde uygulanmıştır (3).

Matrise Li, Mg, Ca, Ti, Zr ve P gibi reaktif elementler ilave edilerek metal-seramik sistemlerinin ıslanma özellikleri artırılır. Bu katkıların katı-sıvı arayüzey enerjisini ve ergimiş metalin yüzey enerjisini azaltmanın yanında arayüzeyde kimyasal reaksiyonlar oluşturarak ıslanabilirliği iyileştirdiği rapor edilmiştir. Belirli alaşım elementlerinin katılması, parçacıklar ve sıvı metal arasında geçici (transient) bir katman oluşturur. Düşük ıslanma açısına sahip bu geçici katman, sıvı metalin yüzey gerilimini azaltır ve parçacıkları, parçacıkların ve matrisin yapısına benzer bir yapıyla çevreler. Mg, Ca, Ti veya Zr gibi reaktif elementler ıslanabilirliği artırmak için katıldığında, sıvı metalurji yöntemleriyle üretilen kompozitlerde seramik ve metal arasında mükemmel bağ görülür. Ergimiş alüminyuma, özellikle alüminanın ıslanabilirliğini iyileştirmek için Mg ilavesi başarılı olmuştur ve farklı seramik parçacıkların (SiC, mika) ıslanabilirliğini iyileştirmek için magnezyum yaygın olarak kullanılır. Alüminyum alaşımlarıyla belirli seramiklerin ıslanabilirliği oksijenle yüksek birleşme eğilimli elementlerin (Li ve Mg gibi) ilave edilmesiyle artırılabilir (3,25).

Alüminyuma ilaveten magnezyum, reaktif element ve aktifleştirici olarak, katı-sıvı arayüzeyinde kimyasal reaksiyonları iyileştirip sıvı metalin yüzey gerilimini azaltmak suretiyle ıslanabilirliği iyileştirir. Ağırlıkça % 3 saf Mg'un alüminyumun yüzey gerilimini 0,760 N/m'den 0,620 N/m'ye düşürdüğü rapor edilmiştir. Mg, Al₂O₃ ve iki değerli geçiş oksitleri (divalent transition metal oxides) arasında kolayca gerçekleşen kimyasal reaksiyonlar MgO.Al₂O₃ gibi alüminyum spinellerin oluşmasına sebep olur. Bu mineral spineller veya oksitler metaller ve seramikler arasında kuvvetli bağ oluşturarak arayüzey bağını kuvvetlendirirler (3).

Ergimiş metaldeki Mg, parçacık yüzeyinden oksijenin uzaklaştırılmasına (scavenging) yardım eder. Yüksek miktarda Mg daha çok parçacığın ergiyik içerisine nüfuzunu sağlar. Al alaşımı matrisli kompozitlerde Mg sadece alaşımlandırma ve yüzey geriliminin azaltılmasına katkıda bulunmakla kalmayıp aynı zamanda daha iyi ıslanabilirlik ve dağılıma da yardımcı olur. Güçlü bir oksijen uzaklaştırıcısı olarak Mg, takviye elemanı yüzeyindeki oksijenle etkileşir, gaz katmanını inceltir ve dolayısıyla ıslanabilirliği iyileştirir ve topaklanma eğilimini azaltır. Bununla birlikte, Mg miktarının belirli bir değeri geçtikten sonra matris içerisinde kaba çökeltiler ve düşük ergime sıcaklığına sahip inklüzyonlar oluşturduğu ve gözenek miktarını artırarak kompozitin mekanik özelliklerini kötüleştirdiği belirtilmiştir (10).

Parçacık yüzeyinde oksijen olduğu zaman, oksit oluşumu için yüksek enerjiye sahip metaller arayüzeyde etkileşim seviyesini azaltan etkin bariyerler olarak görev yapan kararlı oksit oluştururlar. Seramik parçacıkların ısıtılması seramik yüzeylerden toplanmış gazları uzaklaştırarak ıslanabilirliği iyileştirdiği için etkin bir şekilde kullanılmıştır (3). Örnek olarak, parçacıklar sıvı metale ilave edilmeden önce yüksek sıcaklıklarda belirli süre bekletilerek yüzeyleri yapay olarak oksitlendirilir. Bu oksitlendirme özellikle SiC yüzeyinde SiO₂ tabakası oluşturarak alüminyumla ıslanabilirliği iyileştirir (26). Parçacıkların ısıtılmasına ilaveten, ergimiş metalin ultrasonik titreştirilmesi de ıslanabilirliği iyileştirmek için kullanılan bir yöntemdir (27). Bu yöntemin de seramik parçacıkların yüzeyinde toplanmış gazları kısmen uzaklaştırdığı belirtilmiştir (28).

2.6. MMK Malzemelerde Dayanım Artırıcı Mekanizmalar

Matris alaşımlarına göre parçacık takviyeli metal matrisli kompozit (MMK) malzemelerin üstün özellikler sergilediği bilinmektedir. Metal matrisli kompozit malzemelerin çeşitli özelliklerini bileşen fazların özelliklerinden hesaplamak için çeşitli matematiksel modeller geliştirilmiştir. En yaygın olarak kullanılan basit karışımlar kuralı yaklaşımı ile bileşen fazların ağırlıklı ortalamaları kullanılarak ısıtılma genleşme katsayısı, yoğunluk, dayanım, elastikiyet modülü ve diğer bazı özellikler hesaplanabilir. Bununla birlikte, karışımlar kuralında homojen parçacık dağılımı ve

sürekli takviye elamanı düşünüldüğü için MMK malzemelerin elastikiyet modülünü hesaplamada bu yöntemin fazla değerler verdiği görülmüştür (3,29).

Parçacık takviyeli metal matrisli kompozitlerde dayanım artırıcı mekanizma tam olarak anlaşılmış değildir (21,30). Parçacık takviyeli SiC/alüminyum kompozitler üzerinde önemli miktarda araştırma yapılmakla birlikte, bu sistemlerde dayanım artırıcı mekanizmalar üzerinde çelişkiler mevcuttur (30). Genel olarak, matrisin dayanımını artıran herhangi bir faktörün, kompozitin dayanımını da artıracığı kabul edilen bir gerçektir. Bu tür dayanım artırıcı faktörlerin tipik örnekleri çökelme sertleşmesi, incelmış tane yapısından dolayı sertleşme ve takviye elemanları etrafında plastik bölge oluşumundan dolayı dislokasyon sertleşmesidir. Takviye elemanı (parçacık) etrafındaki plastik bölge oluşumu, matris ve takviye elemanlarının ısı genleşme katsayıları arasındaki önemli derecedeki farktan kaynaklanır. Bu plastik bölge oluşumu yüksek dislokasyon yoğunluğundan dolayı süreksiz takviyeli MMK malzemelerde önemli dayanım artırıcı mekanizmalardan biri olarak düşünülür (31).

Dislokasyon oluşumu, matris ve takviye elemanlarının ısı genleşme katsayıları (CTE) arasındaki büyük fark sonucu oluşan diferansiyel ısı büzülmeyle gerçekleşir. Soğuma esnasında ısı büzülmeden dolayı matris-seramik arayüzeyinde gerçekleşen ısı büzülme dislokasyonlar oluşturmak için yeterlidir. Örnek olarak, alüminyumun ısı genleşme katsayısı SiC'un 10 katıdır. Dolayısıyla, 1 μm çapındaki SiC parçacık etrafında alüminyum matriste yaklaşık % 1 uyumsuzluk deformasyonu (misfit strain), ϵ , oluşur. Bu dislokasyonlar, dislokasyon teşvik edici (induced structure) yapı olarak bilinen yapıyı oluştururlar. Üretim esnasında plastik deformasyon sonucu oluşan dislokasyonların hareketleri MMK malzemelerin yapısındaki seramik parçacıklar tarafından engellenebilir (3).

Parçacık takviyeli MMK malzemeler, tipik olarak, takviyesiz matris malzemelerinin sahip olduğu tane yapısından çok daha ince tane yapısına sahiptirler (7,20,32). Şekil 2.3 çeşitli hacim oranlarında Al_2O_3 takviyeli 2024-Al MMK malzemelerin

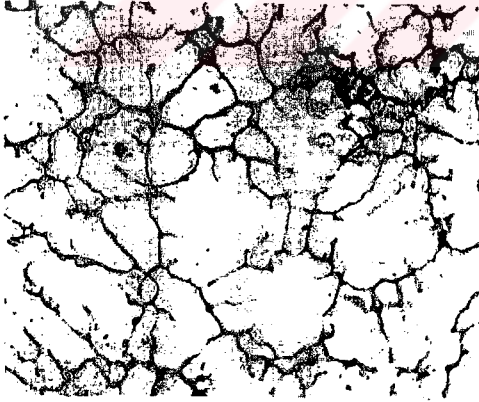
mikroyapılarını ve 1 cm^2 'deki tane sayılarını göstermektedir (20). İnce tane yapısının akma dayanımı üzerindeki etkisi Hall-Petch ilişkisiyle açıklanır (6,7). Tane boyutu önemli derecede metallerin mekanik özelliklerini etkiler. Büyük tane yapısı genelde düşük dayanım, düşük sertlik ve düşük süneklik demektir. Hall-Petch eşitliği en önemli malzeme özelliklerden biri olan akma dayanımını, Y , tane boyutu ile ilişkilendirilir:

$$Y = Y_i + kd^{1/2} \quad [2.3]$$

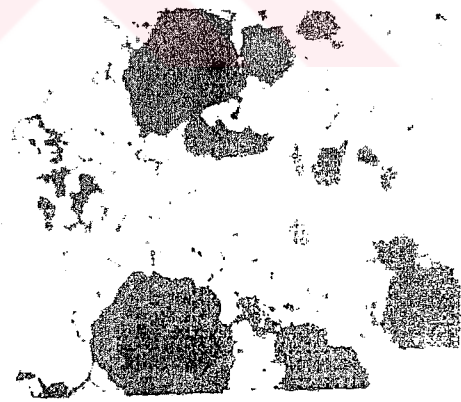
Burada;

Y_i , dislokasyonların hareketlerini engelleyen temel akma dayanımı,
 k , tane sınırları gibi engellerde dislokasyon yığılmasının boyutunu gösteren sabit,
 d , ise tane çapıdır.

Bu eşitlik yeniden kristalleşme sıcaklığının altındaki sıcaklıklarda geçerlidir (33).



Matris – 507 tane



% 10 – 1028 tane

Şekil 2.3. Farklı hacim oranlarında Al_2O_3 parçacık içeren 2024-Al alaşımı matrisli kompozit malzemelerin mikroyapıları (20)

2.7. Parçacık Takviyeli Metal Matrisli Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemleri

Geleneksel mühendislik malzemelerine göre üstün özelliklere sahip parçacık takviyeli MMK malzemelerin ekonomik bir şekilde üretilmesi için etkin üretim yöntemleri geliştirmek bu alanda yapılan çalışmaların önemli bir kısmını teşkil etmektedir. Bu amaçla çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Üretim yönteminin seçiminde ürün kalitesi ve maliyeti temel faktördür. Parçacık takviyeli MMK malzemelerin üretilmesinde kullanılan yöntemler üretim esnasında metal matrisin sıcaklığına göre gruplandırılabilir. Buna göre, üretim yöntemleri:

- a) sıvı hal üretim yöntemleri,
- b) katı hal üretim yöntemleri,
- c) sıvı-katı hal üretim yöntemleri,

olarak üç kategoriye ayrılabilir (34).

2.7.1. Sıvı hal üretim yöntemleri

Sıvı hal üretim yöntemleri parçacık takviyeli MMK malzemelerin üretilmesinde en ekonomik üretim yöntemi olarak görülmesine rağmen bir takım problemler içermektedir. Bunlar; seramik parçacıkların homojen olmayan dağılımı, aşırı arayüzey reaksiyonları, mekanik karıştırma esnasında parçacık kırılması (35) ve takviye elamanı ve matris malzemesi arasındaki zayıf ıslanabilirliktir (36). Bu tür problemlerin, yetersiz döküm teknolojisinden kaynaklandığı rapor edilmiştir (8,37). 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. Ayrıca, sıvı hal üretim teknikleri MMK malzemelerin üretilmesinde katı hal üretim tekniklerinden daha az zaman gerektirir (19). Bu yüzden, parçacık takviyeli MMK malzemelerin sıvı hal yöntemleriyle üretilmesi düşük maliyetleri nedeniyle otomotiv parçaları üreticileri için maliyetleri düşürmede ve performansı artırmada iyi bir fırsat sunar (3,35,36,38).

Sıvı metal karıştırma (döküm), seramik ön kalıba sıvı metal infiltrasyonu, sıvı metal karıştırma-basınçlı döküm, püskürtme biriktirme (spray deposition) ve reaksiyon (in situ) yöntemleri gibi MMK malzemelerin üretilmesinde kullanılan sıvı hal yöntemleri aşağıda kısaca açıklanmıştır:

2.7.1.1. Sıvı metal karıştırma (döküm) yöntemi

Bu yöntemde SiC ve Al₂O₃ gibi seramik parçacıklar alüminyum alaşımı sıvı haldeyken ilave edilir. Parçacıkların ilavesi esnasında ve ilave işlemi tamamlandıktan sonra belirli bir süre bir karıştırıcı ile mekanik olarak karıştırılır ve daha sonra normal metal parçaların dökümüne benzer bir yolla kalıp içerisine dökülür (39). Bu yöntemin başarısı takviye elemanı ve sıvı metal arasında ıslanabilirliğin artırılmasına ve dolayısıyla takviye elemanının kolay ilave edilmesine ve homojen dağılımına bağlıdır (10). Çoğunlukla seramik parçacıkların yoğunluğu 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 ısıtılması işlemi ıslanabilirliği iyileştirmede, en az hata ve gözeneklilikle iyi bir parçacık dağılımı sağlamada, parçacık topaklanmasında, inklüzyonların oluşumunda ve arayüzey reaksiyonlarını belirlemede önemli faktörlerdir.

Bu yöntemle üretilen parçacık takviyeli MMK malzemelerde ekstrüzyon ve dövme gibi ikincil işlemler daha iyi matris-takviye bağı, daha az gözenek miktarı ve daha düzenli parçacık dağılımı sağlayarak, özelliklerde önemli ölçüde gelişmeler sağlayabilir (34).

2.7.1.2. Basınç yardımıyla sıvı metal infiltrasyonu (emdirme)

Bu yöntemde, ergimiş alaşım gözenekli seramik ön kalıp içersine, asal bir gaz veya mekanik bir aletle basınç uygulanarak infiltre edilir. Matris ve takviye elemanını

birleştirmek için gerekli olan basınç özellikle takviye elemanının matris malzemesi tarafından ıslanabilirliğine bağlıdır. Bu yöntemde iyi bir arayüzey 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 (40). Bu yöntemin ilk ticari uygulaması, gözenekli bir seramik ön kalıba yüksek basınç uygulayarak alüminyum alaşımının infiltre edilmesi 1980’li yılların başlarında Toyota Motor firması tarafından gerçekleştirilmiştir (41).

2.7.1.3. Sıvı metal karıştırma - basınçlı döküm

Bu yöntemde, sıvı metal – takviye elemanı karışımının kalıp içerisine dökülmesine kadar uygulanan işlemler “sıvı metal karıştırma” yöntemi ile aynıdır. Bu yöntemi farklı yapan, sıvı metal takviye elemanı karışımının kalıp içerisine dökülmesinden sonra, mekanik bir araçla belirli miktarda basınç uygulanmasıdır. Bu uygulanan basınç sayesinde sıvı metal takviye elemanı karışımının kalıp duvarları ile daha iyi teması sonucunda hızlı bir soğuma gerçekleştirilir ve sonuç olarak daha ince mikroyapı, daha az gözenek, hızlı soğumadan dolayı daha az arayüzey reaksiyonları ve matris ile takviye elemanı arasında daha iyi bir bağ sağlanır (7,17,35). Matris ve takviye elemanı arasındaki ıslanabilirlik ve bağ kuvveti uygulanan basınç yardımıyla artırılır. Burada, uygulanan basıncın büyüklüğü MMK malzemenin mekanik özelliklerini belirlemede önemli bir rol oynar (35). Bu yöntem günümüzde genel uygulamalar için düşük maliyetli kompozit malzeme üretiminde büyük bir potansiyele sahip olarak görülmektedir (18).

Ergimiş matris malzemesinin içerisine katılan ergime derecesi oldukça yüksek olan katı takviye elemanları kompozit karışımın akıcılığını azalttığı ve başarılı bir şekilde döküm işlemini zorlaştırdığı (39) dikkate alındığında, basınç uygulayarak döküm yapma işleminin önemi ortaya ayrıca çıkmaktadır. Uygulanan basınç sayesinde kompozit karışım kalıp hacmini rahatlıkla doldurabilir ve kalıbın tam şeklini alır.

2.7.1.4. Püskürtme biriktirme (Spray deposition)

Bu yöntem, önceleri sürekli elyaf takviyeli kompozit malzemelerin üretiminde kullanılmıştır. Parçacık takviyeli kompozit malzemeler için metal malzemelerin üretimi için geliştirilen Osprey Yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemde ergimiş metal gaz içinde atomize edilir ve daha sonra kapalı bir oda içerisinde bir yüzeye püskürtülür. Püskürtülen yüzeyde metal hızlı bir şekilde soğutulur. Bu hızlı soğuma sonucu reaksiyon zamanı kısa olur ve dolayısıyla zararlı reaksiyonlar azaltılmış olur. Çeşitli blok, tüp vb. ön kalıp şekiller bu metotla üretilebilir (18).

2.7.1.5. Reaksiyon (In-situ) yöntemi

Reaksiyon yöntemi matris ve takviye elemanı arasındaki ıslanabilirlik probleminden dolayı geliştirilmiştir. MMK malzemenin takviye elemanı parçacıkları sıvı-katı-gaz reaksiyonu sonucu oluşur (42). 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. Bu yöntemin avantajları arasında takviye elemanlarının morfolojilerinin kontrol edilebilmesi, parçacık matris arayüzeyinin temizliği ve reaksiyon sonucu oluşan takviye elemanı ile matris malzemesi arasındaki uyumluluk vardır (43).

Yapılan son çalışmalarda, Al-Al₂O₃ reaksiyon MMK malzemenin ergimiş alüminyuma TiO₂ parçacıklarının (44) ve CuO parçacıklarının (45) katılmasıyla elde edildiği rapor edilmiştir. Silisyum parçacık takviyeli Zn-27Al kompozitin reaksiyonla elde edilmesi de yarı katı hiper ötektik Al-Si alaşımının ergimiş Zn-Al alaşımına karıştırılmasıyla elde edilmiştir (46). Bununla birlikte, bu yöntemde reaksiyonla elde edilen parçacıkların hacim oranını kontrol edebilmek oldukça zordur (47).

2.7.2. Katı hal üretim yöntemleri

Geleneksel olarak parçacık takviyeli kompozit malzemelerin üretilmesinde kullanılan yöntemlerdir. Matris ve takviye elamanı parçacıklarının karıştırılması, preslenmesi ve sinterlenmesi gibi bir takım işlemler gerektirdiği için maliyeti artırmakla birlikte sıvı metal karıştırma yöntemiyle karşılaştığında bu yöntemlerle özellikleri daha iyi kompozit malzemeler üretilir (48).

2.7.2.1. Toz metalurjisi

Bu yöntemde öncelikle matris ve takviye elamanı tozları karıştırılır ve bu karışım istenilen şekli elde etmek için kullanılacak olan kalıp içerisine yerleştirilir. Karşımı sıkıştırmak için basınç uygulanır. Parçacıklar arasında bağ oluşturmak için sıkıştırılan bu toz karışımı matris alaşımının ergime sıcaklığının altında bir sıcaklıkta asal bir gaz ortamında sinterlenir. Bu sıcaklık, katı hal difüzyonu oluşturacak kadar yüksek olmalıdır. Tozlar karıştırıldıktan sonra doğrudan sıcak izostatik presleme (hot isostatic pressing - HIP) yöntemiyle de sıcak preslenebilir. HIP metodu yüksek yoğunluklu malzeme üretimi için uygundur (49). Toz metalurjisi yöntemi ile üretilen parçaların genelde sıvı hal üretim yöntemleriyle üretilmiş parçalardan daha iyi mekanik özelliklere sahip olduğu bilinmektedir. Çünkü, bu yöntemde, homojen olmayan parçacık dağılımı problemi daha azdır. Bununla birlikte, bu yöntemle üretilen parçaların maliyeti sıvı hal üretim yöntemleriyle üretilen parçaların maliyetinden daha yüksektir (9,50).

2.7.2.2. Mekanik alaşımlama

Karıştırma esnasında, ince takviye elamanı parçacıkları yüzeylerindeki nem ve elektrostatik yükten dolayı topaklanma eğiliminde olabilirler (51). Gelişmiş bir toz metalurjisi yöntemi olan “mekanik alaşımlama” bu problemi çözmek için geliştirilmiştir (52). Mekanik alaşımlama yöntemi karıştırma esnasında kuru ve katı haldeki tozların birbirlerine periyodik olarak kaynaklanmasını ve tekrar bu kaynakların kırılmasını sağlayarak daha ince ve daha homojen bir mikroyapı elde

edilmesini sağlayarak, dayanımı yüksek olan kompozit malzemelerin üretilmesinde kullanılır (53).

2.7.3. Katı + sıvı hal üretim yöntemi

2.7.3.1. Yarı katı karıştırma yöntemi

“Compocasting” ve “rheocasting” olarak da adlandırılır. Sıvı metal karıştırma yöntemindeki ıslanabilirlik problemini çözmek için geliştirilen yöntemlerden biridir. Bu yöntemde, seramik parçacıklar matris içerisine alaşımın sıvı-katı sıcaklığındaki bir sıcaklıkta katılır ve bu işlemi daha sonra düşük vizkoziteli karışımı mekanik olarak karıştırma işlemi takip eder. Karışımın yarı katı olması, karıştırma esnasında parçacık ilavesini kolaylaştırır. 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 defomasyon sonucunda katı fazların kırılmasıyla parçacıkların topaklanması engellenir. Bazı araştırmacılar tarafından bu yöntemin ıslanabilirliği artırdığı ve iyi bir parçacık dağılımı sağladığı için etkili olduğu belirtilmektedir (3,49).

2.8. MMK Malzemeler ile İlgili Literatür Araştırması

2.8.1. Parçacık takviyeli MMK malzemelerin üretimi

MMK malzemelerin üretilmesinde dikkat edilmesi gereken husus homojen parçacık dağılımı, parçacık/takviye elemanı arasında iyi bir bağın oluşması ve özellikleri kötüleştirci arayüzey reaksiyonlarının en az düzeyde olmasıdır. Genel amaçlı kullanımlar (otomotiv ve spor) için, parçacık takviyeli MMK malzemelerin üretilmesindeki araştırmalar maliyeti düşük üretim yöntemlerinin geliştirilmesine yönelmiştir. Parçacık takviyeli MMK malzemelerin üretilmesinde ilk zamanlarda geleneksel toz metalurjisi yöntemi kullanılmıştır. Daha sonraları sıvı metalurjisi teknikleriyle (parçacıkların katılaşmadan önce ergimiş metale ilave edilmesi)

parçacık takviyeli MMK malzeme üretmek için çalışmalar yapılmıştır (16). Son yıllarda yapılan çalışmalar ise biriktirme (deposidon) ve reaksiyon (in-situ) yöntemlerinin ekonomik olarak bu malzemelerin üretilmesinde kullanılabileceğini göstermiştir ve bu amaçla yapılan çalışmalar devam etmektedir. Toz metalurjisi yönteminin yüksek maliyeti ve üretilen parça boyutlarının döküm yöntemiyle üretilen parçalardan daha küçük olması nedeniyle genel amaçlı MMK malzemelerin üretilmesinde doğru bir seçenek olmadığı belirtilmiştir (18). Günümüzde, sıvı metal karıştırma yöntemi, maliyet bakımından ve karmaşık şekilli parçaların son şekline yakın bir geometride üretilmesinde en uygun yöntem olarak görülmektedir ve ticari olarak parçacık takviyeli MMK malzeme üretiminde yaygın biçimde kullanılmaktadır (8,10,38,49).

Parçacık takviyeli MMK malzemelerin sıvı metal karıştırma yöntemiyle üretilmesi için yapılan ilk çalışmalardan bir tanesi Surappa ve Rohatgi'ye (54) aittir. Bu çalışmada, çeşitli ağırlık oranlarında (en fazla % 4,5) parçacıklar ergimiş alüminyuma ilave edilerek alüminyum-alümina, alüminyum-illit ve alüminyum-silisyum karbür parçacık takviyeli MMK malzemelerin üretilmesi için bir döküm yöntemi geliştirilmiştir. 10-200 µm boyutlarında uygun ısıtılma tabi tutulmuş kaplanmamış seramik parçacıklar ergimiş alüminyum alaşımı içerisinde mekanik karıştırıcı yardımıyla oluşturulan vortekse ilave edilerek üretilmiştir. Bu çalışmayla uygun ısıtılma tabi tutulmuş parçacıkların ergimiş alüminyum içerisinde oluşturulan vortekse katılabileceği görülmüştür. Üretilen MMK malzemelerin mikroyapı incelemelerinden seramik parçacık dağılımının makro düzeyde düzenli olduğu ve bu parçacıkları içeren ergimiş alüminyum alaşımının çeşitli şekillere dökülebileceği görülmüştür.

Sıvı metal karıştırma yönteminin başarısı, takviye elemanının matrise ilave edilebilmesi ve takviye elemanı ile matris arasında iyi bir bağın sağlanmasıdır. Sıvı alüminyumun seramik parçacıkları ıslatmama eğiliminde olduğu ve bu amaçla çeşitli elementlerin ıslanabilirliği iyileştirmek için karıştırma esnasında çeşitli oranlarda ilave edildiği bilinmektedir. Örnek olarak Sukumaran et al. (10) Mg ilavesi ile ve Li

et al. da (55) Li ilavesi ile ıslatma eğilimini artırmaya çalışmışlardır. Bu amaçla, magnezyum en yaygın olarak kullanılan alaşım elementidir (23).

Sukumaran et al. (10) Al-7Si-ağırlıkça %10 SiC_p kompozit malzemelerin yapı ve mekanik özellikleri üzerinde Mg katkısının etkisini sıvı metal karıştırma yöntemiyle ürettikleri malzemelerde incelemişlerdir. Aynı zamanda matris alaşımı da değişen oranlarda Mg içermiştir. Matris alaşımındaki magnezyuma ilave olarak, bu malzemelerin üretimi esnasında ağırlıkça % 0.1 - % 3 magnezyum katılarak uygun magnezyum miktarının belirlenmesine çalışılmıştır. Matriste ağırlıkça % 1'den daha az magnezyum olması durumunda, SiC parçacıkları topaklanma eğilimi göstermiştir. Ağırlıkça % 1 magnezyum düzenli parçacık dağılımı sağlamıştır ve daha yüksek oranlarda magnezyum, SiC parçacıkların düzenli dağılımında daha fazla bir iyileşme sağlamamıştır. Ağırlıkça % 1'den fazla magnezyum, mekanik özellikleri kötüleştirmiştir. Bu çalışmayla sıvı metal karıştırma yöntemiyle alüminyum 356 – SiC_p takviyeli kompozit malzeme üretmede ilave magnezyumun gerekli olduğu görülmüştür.

Abdel-Azim et al. (20) sıvı metal karıştırma yöntemiyle 2024-Al matrisli ve çeşitli oranlarda Al₂O₃ takviyeli MMK malzeme üretiminde ıslanabilirliği iyileştirmek için Al₂O₃ parçacıklarını, ergimiş alüminyuma ilave etmeden önce, nitrik asitle kimyasal olarak aktifleştirmiş ve daha sonra Na⁺ iyonları içeren çözelti içerisinde birkaç saat bekletmişlerdir. Daha sonra bu parçacıklar 500 °C'a ısıtılarak ergimiş metal içerisine ilave edilip MMK malzemeler üretilmiştir. Bu çalışmada hacimce % 10, % 20 ve % 30 oranlarındaki parçacıklar başarıyla ilave edilmiştir. Alümina parçacıkların aktifleştirilmesi sonucu karıştırma süresi azaltılmıştır. Daha önce yapılan çalışmada parçacıkların aktifleştirilmemesinden dolayı karıştırma zamanının çok daha uzun olduğu belirtilmiştir.

Taheri-Nassaj et al. (25) tarafından yapılan bir çalışmada alüminyum matrisli AlN parçacık takviyeli MMK malzemelerin sıvı metal karıştırma yöntemiyle üretimi esnasında, matrise ilave edilen Mg ve Li'um ıslanabilirliği iyileştirerek parçacık ilave zamanını azalttığı gözlemlenmiştir.

Zhou ve Xu (36), sıvı metal karıştırma yöntemiyle, A356 ve 6061 matrisli hacimce % 10 ve 20 SiC_p takviyeli MMK malzemeler üretmek için, SiC parçacıkları ergimiş alaşıma ilave ettiklerinde, SiC'ün alüminyumdan daha yüksek yoğunluğuna rağmen yüzeye çıktığını gözlemlemişlerdir. Bu daha önce de belirtildiği gibi yüksek yüzey gerilimine ve parçacıklar ve ergimiş alaşım arasındaki zayıf ıslanabilirliğe atfedilmiştir. Buradaki zayıf ıslanabilirliğin parçacıkların etrafındaki gaz katmanından kaynaklanabileceği belirtilmiştir. Bu gibi problemlerin karıştırma gibi bir mekanik kuvvetle giderilebileceği, fakat ürettikleri kompozitlerde alaşım tamamen sıvı haldeyken mekanik karıştırma ile bu problemin çözölemeyeceğini belirtmişlerdir. Bu nedenle iki aşamalı bir karıştırma işlemi gerçekleştirmişlerdir. Alüminyum alaşımları grafit pota içerisine yerleştirilip tamamen eritilmesi için fırın sıcaklığı alaşımın sıvı hal sıcaklığının üzerine çıkarılarak alüminyum eritilmiş ve daha sonra sıvı sıcaklığın altında ergiyik yarı katı hale gelinceye kadar soğutulmuştur. Bu aşamada parçacıklar ilave edilip elle karıştırma işlemi yapılmıştır. Yarı katı halde iken, ana α -Al fazının varlığından dolayı karıştırma işleminin SiC parçacıklar üzerine büyük kuvvetler oluşturarak ve gaz katmanını parçalayarak ıslanabilirliği iyileştirebileceği belirtilmiştir. Alaşım yarı katı haldeyken otomatik bir tertibatla karıştırmak zor olduğu için bu aşamada karıştırmanın elle yapılması gerekmiştir. Bu durumda yeterli miktarda karıştırma yapıldıktan sonra kompozit karışımın sıcaklığı yükselttilerek tamamen sıvı hale getirilmiştir. Bu durumda, 20 dakika süreyle 150 – 200 rpm karıştırma hızında otomatik karıştırma yapıp, fırın sıcaklığı 730 ± 10 °C'de tutulmuştur. Karıştırma işlemini müteakiben karışım, önceden ısıtılmış kalıba dökülmüştür. Yapılan mikroyapı incelemelerinden, bu yöntemin ıslanabilirliği iyileştirdiği ve düzenli parçacık dağılımı sağladığı görölmüştür.

Sato ve Mehrabian da (56) yarı ergimiş alaşım içerisindeki birincil katıların metal olmayan parçacıkların yüzeye çıkmalarını ve topaklanmalarını engelleyeceğini daha önce yaptıkları çalışmalarında belirtmişlerdir.

Basınçlı döküm yöntemiyle üretilen metal ve alaşımlarının normal döküm yöntemiyle üretilen malzemelere göre daha üstün özellikler sergilediği bilinmektedir. Bu yöntemle parçalar son şekline veya son şekline yakın geometride üretilebilirler. Basınçlı döküm yöntemi sağladığı üstün özellikler nedeniyle MMK malzemelerin de üretilmesinde kullanılmaya başlanmıştır (17).

Seo ve Kang (35) hacimce % 15 SiC_p/Al MMK malzeme için üretim parametrelerini ve uygulanan basıncı optimize etmeye yönelik araştırma yapmışlardır. MMK malzemeleri üretmek için 70, 100 ve 130 MPa basınç uygulanmıştır. Üretilen MMK malzemeler çekme ve sertlik deneylerine tabi tutulmuştur ve kırılma yüzeyleri tarama elektron mikroskobu (SEM) ile incelenmiştir. Ergimiş malzemenin sıcaklığı 680-700 °C, karıştırma hızı 750 rpm, parçacık ekleme miktarı 2 g/min ve parçacık ilavesi bittikten sonra 5 dakika süre ile karıştırma uygulanarak üretilen MMK malzemeler en iyi sonucu vermiştir. Matris ve takviye elemanı arasındaki ıslanabilirliğin ve bağ kuvvetinin uygulanan basınçla iyileştiği ve çekme dayanımının % 10 arttığı görülmüştür. En yüksek dayanımı 100 MPa basınç uygulanan MMK malzemelerde elde etmişlerdir. Kırılma yüzeylerinden, 130 MPa basınçta çoğu parçacıkların kırıldığı ve parçalandığı görülmüştür. Bununla birlikte, basıncın artmasıyla sertlik de artmıştır.

2.8.2. Parçacık takviyeli MMK malzemelerin mekanik özellikleri

Genellikle sünek, düşük dayanımlı ve düşük elastikiyet modülüne bir matrisle sert, kırılğan, yüksek dayanımlı ve yüksek elastikiyet modüllü seramik parçacıkların çeşitli yöntemlerle bir araya getirilmesiyle oluşturulan parçacık takviyeli MMK malzemelerin mekanik ve fiziksel özelliklerinde bileşen fazların özellikleriyle karşılaştırıldığında önemli derecede değişiklikler olur. Matris malzemesine göre akma, çekme ve bazı durumlarda yorulma dayanımı oda sıcaklığında ve yüksek sıcaklıklarda önemli derecede artar, hatta yüksek sıcaklıklarda mekanik özelliklerdeki iyileşme oranı oda sıcaklığındaki iyileşme oranından daha fazla olur. Parçacık takviyeli MMK malzemeler aynı zamanda matris malzemesine göre yüksek elastikiyet modül, düşük ısı genleşme katsayısı, yüksek aşınma direnci ve yüksek

sertlik gibi fiziksel özelliklere de sahiptir (57). Bu iyi özelliklerle birlikte MMK malzemelerin sünekliği matris malzemesine göre oldukça düşüktür.

Bu bölümde özellikle sıvı karıştırma döküm yöntemiyle üretilmiş parçacık takviyeli MMK malzemelerin çeşitli özelliklerini inceleyen çalışmalar ve üretim parametrelerinin, mekanik özellikler üzerindeki etkileri gözden geçirilmiştir.

Kamat et al. (58) sıvı metal karıştırma yöntemiyle üretilmiş 2014 ve 2024 alüminyum matrisli çeşitli hacim oranlarda farklı boyutlardaki alümina parçacık takviyeli MMK malzemelerin takviye elemanı boyutu ve hacim oranına göre akma ve çekme dayanımındaki değişimleri incelemişlerdir. Alümina parçacıkların boyutlarının ve hacim oranlarının her iki matrisli MMK malzemede de çekme özelliklerini önemli derecede etkilediği görülmüştür. 2014 alüminyum alaşımı ortalama 5 μm boyutlu % 2 hacim oranında alümina parçacıkla takviyelendirildiği zaman akma dayanımı 97 MPa'dan 128 MPa'a çıkmıştır. İlave edilen parçacık hacim oranının % 5'e çıkarılmasıyla akma dayanımı 137 MPa'a ulaşmıştır. Aynı şekilde 15 μm boyutlu hacimce % 5 oranında parçacık ilave edilmesiyle akma dayanımı 118 MPa seviyesinde kalmıştır. Parçacık hacim oranı ve boyutuyla akma ve çekme dayanımındaki benzer davranışlar 2024-Al alaşımı matrisli MMK malzemelerde de görülmüştür.

Akma ve çekme dayanımındaki bu iyileşmelerle birlikte, matrise parçacık ilavesiyle yüzde uzamada önemli derecede azalmalar olmuştur. Artan parçacık hacim oranı ve parçacık boyutuyla süneklikteki azalma artmıştır. Bu sonuçlardan makro düzeyde sünekliğin azaldığı sonucu çıkarılsa da kırılma yüzeylerinin tarama elektron mikroskobuyla incelenmesiyle, bölgesel olarak sünek kırılma mekanizmasının hakim olduğu görülmüştür.

Parçacık takviyeli MMK malzemelerde artan parçacık hacim oranıyla akma ve çekme dayanımının arttığı fakat belirli bir orandan sonra artış hızının azaldığı gözlenmiştir (7).

Abdel-Azim et al. (20) nitrik asitle kimyasal olarak aktifleştirilmiş ve daha sonra Na^+ iyonları içeren çözeltide impregne edilmiş Al_2O_3 parçacıkları hacimce % 10, 20 ve 30 oranlarında sıvı metal karıştırma yöntemiyle 2024 alüminyum alaşımına ilave ederek ürettikleri MMK malzemelerde, akma dayanımının artan hacim oranıyla arttığını fakat çekme dayanımının azaldığını gözlemlemişlerdir. Matris alaşımının ve üretilen MMK malzemelerin 1 cm^2 'sindeki tane sayısı tespit edilmiştir. Matriste tane sayısı 507 iken bu sayı parçacık oranındaki artışla artmış ve % 30 parçacık takviyeli MMK malzemede 1657'ye ulaşmıştır. Bu çalışmada da takviye elemanı ilavesiyle süneklikte azalma olduğu görülmüştür fakat bu azalmanın Kamat ve arkadaşlarının (58) belirttiği azalma kadar fazla olmadığı tespit edilmiştir.

Surappa ve Rohatgi de (54) çeşitli ağırlık oranlarında alümina ilave edilerek üretilen Al-11.8 Si alaşımı kompozit malzemede matris alaşımına göre çekme dayanımının azaldığını yaptıkları çalışmada gözlemlemişlerdir. Rizkalla ve Abdulwahed (59) toz metalurjisi yöntemi ile ürettikleri alüminyum matrisli SiO_2 parçacık takviyeli kompozit malzemelerde matrisin çekme dayanımından daha düşük çekme dayanımları elde etmişlerdir. Çekme dayanımındaki bu azalmayı, artan parçacık oranı ile artan gözeneklere atfetmişlerdir.

Sıvı metal karıştırma yöntemiyle kompozit malzeme üretiminde ıslanabilirliği ve dolayısıyla mekanik özellikleri iyileştirdiği için Mg ve Li gibi çeşitli alaşım elementlerinin, parçacıkları ilave etmeden veya ilave esnasında katıldığı bilinmektedir.

Sukumaran et al. (10), Al-7Si-10SiC_p MMK malzemenin sıvı metal karıştırma yöntemiyle üretimi esnasında matristeki magnezyuma ek olarak çeşitli miktarlarda Mg ilave ederek iyi mekanik özellikleri veren Mg miktarını belirlemeye çalışmışlardır. Ürettikleri MMK malzemeleri çekme deneyine tabi tutmuşlar ve en yüksek çekme dayanımını ağırlıkça ilave % 1 Mg içeren kompozitte elde etmişlerdir. %1'den daha fazla Mg ilavesiyle çekme dayanımını azaldığını gözlemlemişlerdir. Bu çalışmada % 1'den fazla Mg ilavesi ile gözeneklerin arttığı ve daha kaba

çökeleklerin oluştuğu tespit edilmiş ve dayanımdaki düşüş ise artan gözeneklere ve kaba çökeltilere atfedilmiştir. Çok miktarda katılan magnezyum gibi reaktif elementlerin düşük ergime sıcaklığına sahip içerikler oluşturarak matrisin mikroyapısını değiştireceği ve mekanik özellikleri kötüleştireceği belirtilmiştir. Yapılan bu çalışmada, çok miktarda magnezyumun dayanım artırıcı Mg_2Si fazına ilaveten düşük ergime sıcaklığına sahip Mg_5Al_8 fazı oluşturduğu belirtilmiştir.

Seo ve Kang (35), sıvı metal karıştırma-basınçlı döküm yoluyla MMK üretilmesinde en iyi mekanik özellikleri veren optimum basınç miktarının bulunmasına yönelik çalışma yapmışlardır. Al-Si alaşımı matris malzemesi ve SiC parçacıklar takviye elemanı olarak kullanılmıştır. 70, 100 ve 130 MPa basınç kullanılarak üretilen MMK malzemeler çekme deneylerine tabi tutulmuşlardır. Matris ve takviye elemanı arasındaki ıslanabilirliğin ve bağ kuvvetinin uygulanan basınçla iyileştiği ve de çekme dayanımının % 10 arttığı görülmüştür. Çalışmalarında en yüksek dayanımı 100 MPa basınç uygulanan MMK malzemelerde elde etmişlerdir. 130 MPa basınçta çoğu parçacıkların kırıldığı ve parçalandığı görülmüştür.

Singh et al. (11), Al- Al_2O_3 -MgO MMK malzemenin yüksek sıcaklıktaki çekme dayanımlarını incelemişlerdir. 40-150 μm boyutlarında Al_2O_3 parçacıklar özel yöntemlerle MgO ile kaplanarak, grafit pota içerisinde ergitilmiş olan alüminyumda karıştırıcı yardımıyla oluşturulan vortekse düzenli bir şekilde ilave edilmiştir. Karıştırma işlemini müteakiben, karışım dökme demir kalıp içerisine dökülüp yarı otomatik bir presle 80-140 MPa arasında farklı basınçlar uygulanmıştır. Karşılaştırma amacıyla basınçsız döküm de yapılmıştır. Bu çalışmada kalıp sıcaklığının etkisinin de incelenmesi için, karışımı kalıba dökmeden önce kalıp sıcaklığı ortam ($\sim 25^\circ C$), $100^\circ C$ ve $200^\circ C$ gibi üç farklı sıcaklıkta tutulmuştur.

Çekme deneyleri, ortam ($\sim 25^\circ C$), $100^\circ C$, $200^\circ C$ ve $300^\circ C$ sıcaklıklarındaki kalıplara dökülen numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. 80-140 MPa arasında basınç uygulanmasıyla, üretilen MMK malzemelerin yüksek sıcaklıktaki mekanik özellikleri önemli derecede artmıştır. En iyi mekanik özellikler ortam sıcaklığında

döküm yapılan kalıba 140 MPa basınç uygulanmasıyla elde edilmiştir. Kalıp sıcaklığının sistematik olarak artmasıyla özellikler kötüleşmiştir. Ortam sıcaklığı, 100 °C, 200 °C ve 300 °C’de yapılan çekme deneylerinde sırasıyla 207,9, 197,8, 179 ve 160,4 MPa çekme dayanımları elde edilmiştir. Sıvı metal karıştırma yöntemiyle elde edilen kompozit malzemelerle karşılaştırıldığında, sıvı metal karıştırma – basınçlı döküm yöntemiyle üretilen MMK malzemelerin çekme dayanımı 100 °C’de % 52, 200 °C’de % 161 ve 300 °C’de % 162 fazla olmuştur. Basınç yardımıyla üretilen MMK malzemelerin kırılma yüzeylerinin SEM mikroskobu ile incelenmesinde tamamen sünek yapı görülürken, basınçsız üretilen MMK malzemelerde ise yarı sünek veya kırılğan yapı görülmüştür. Basınçtan dolayı gözenekler veya dentritler arası dolmamış bölge görülmemiştir. En iyi sonuçlar uygulanan en yüksek basınçta elde edildiği için, basınç miktarının artırılarak mekanik özelliklerin daha da iyileşebileceği yönünde bir öneri getirilmiştir.

Üretim yönteminin MMK malzemelerin maliyetini ve mekanik özelliklerini belirlemede etkin bir unsur olduğu için etkin üretim yöntemleri geliştirmeye yönelik çok sayıda çalışma yapılmıştır. Bununla birlikte, sistematik olarak üretim yöntemlerinin mekanik özelliklere etkisini inceleyen çalışmaların sayısı oldukça azdır. Bu amaçla Kurivilla et al. (60), iki tür Al/TiB₂ kompozit malzemelerin mekanik özelliklerini karşılaştırmıştır. Bu kompozit malzemelerin birisi toz metalurjisi yoluyla diğeri de XD yöntemiyle üretilmiştir. XD bir çeşit reaksiyon yöntemidir (32). XD yöntemiyle üretilmiş MMK malzeme toz metalurjisi yöntemiyle üretilmiş MMK malzemeye göre oldukça üstün özellikler göstermiştir. Ayrıca karşılaştırma maksadı ile saf alüminyumun da mekanik özellikleri verilmiştir (Çizelge 2.1). XD yöntemiyle üretilmiş MMK malzemenin üstün özellikleri oldukça küçük boyutlarda TiB₂ parçacıklarının varlığı, matris ile takviye elemanı arasındaki iyi birleşme ve yoğun arayüzey dislokasyon yapısı ile açıklanmıştır.

Çizelge 2.1. Toz metalurjisi ve XD yöntemiyle üretilen MMK malzemelerin mekanik özellikleri (60)

Malzeme	Elastiklik Modülü E (GPa)	Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Sertlik (VSD)
Saf Al	70	64	90	37
Al/%20 hac TiB ₂	96	121	166	85
Al/%20 hac TiB ₂ (XD)	131	235	334	110

Daha önce yapılan bir çalışmada, Arsenault ve Wu (48), toz metalurjisi yöntemiyle üretilmiş SiC/Al kompozitlerle sıvı metal karıştırma yöntemiyle üretilmiş SiC/Al kompozitleri karşılaştırmışlardır. Her iki yöntemde de takviye elemanlarının boyutu ve dağılımı aynı tutulmaya çalışılmıştır. Sıvı metal karıştırma yönteminde homojen bir parçacık dağılımı için gayret edilmişse de toz metalurjisi yöntemiyle üretilen kompozitlerdeki kadar homojen bir parçacık dağılımı elde edilememiştir. Dolayısıyla, sıvı karıştırma döküm yöntemiyle üretilen kompozit malzemelerin mekanik özellikleri, toz metalurjisiyle üretilenler kadar iyi olmamıştır. Takviye elemanlarının boyutlarının küçük olduğu durumlarda her iki kompozitin mekanik özellikleri arasındaki fark küçük olmuştur (%3). Parçacık boyutu büyüdüğünde (250 µm) bu fark %15'e kadar çıkmıştır.

2.8.3. Literatür özeti

Parçacık takviyeli MMK malzeme üretmek için çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Bu yöntemler arasından sıvı metal karıştırma (döküm) yönteminin düşük maliyetli üretim için iyi bir potansiyele sahip olduğu görülmüştür. Seramik parçacıkların sıvı metal ile ıslanmama eğilimi, homojen olmayan parçacık dağılımı, gaz boşlukları ve istenmeyen arayüzey reaksiyonları gibi problemler seramik parçacıkları birtakım işlemlere tabi tutarak, uygun bir karıştırıcı kullanarak ve sıcaklık ve karıştırma hızı gibi işlem parametrelerini optimize ederek giderilebilmiştir.

Sıvı metal karıştırma metodu ile üretilen MMK malzemelerde ergime sıcaklığı matris malzemesinden oldukça yüksek olan katı parçacıklar ergimiş karışımın akıcılığını

düşürerek başarılı bir döküm yapılmasını engellemektedir ve gözenek miktarını arttırmaktadır. Üretilen MMK malzemelerin özelliklerini kötüleştirdiği için gözenek miktarının azaltılması gerekmekte ve bu da çoğunlukla üretim sonrası dövme ve ekstrüzyon gibi ilave işlemler gerektirmektedir. İkincil işlemlere gerek kalmadan kaliteli MMK malzeme üretmek için sıvı metal karıştırma-basınçlı döküm metodu gündeme gelmiş ve bu metotla üretilen MMK malzemelerin özelliklerinde önemli derecede iyileşmeler görülmüştür. Bu faydaları nedeniyle bu çalışmada MMK malzemelerin üretilmesi için sıvı metal karıştırma-basınçlı döküm yöntemi tercih edilmiştir.



3. TALAŞLI İMALAT VE İŞLENEBİLİRLİK

3.1. Giriş

Talaşlı imalat işlemi en önemli imalat yöntemlerinden biridir. 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, üzerindeki fazlalıklar uygun takım tezgahı ve kesici takım kullanılarak, talaşlar şeklinde uzaklaştırılıp, istenilen boyutlar ve yüzey kalitesi sağlanır. Uzay ve havacılık, otomotiv, kalıp gibi endüstriyel alanlarda çoğu ürüne son şekli talaşlı imalat işlemleriyle verilir (61,62).

Talaşlı imalat işleminin maliyeti endüstriyel ürünlerin maliyetinde önemli bir orana sahip olduğu için iş parçasının işlenebilirliklerini ve kesici takımların kesme performanslarını arttırmak/optimize etmek için çok sayıda çalışma yapılmıştır. İşlenebilirlik, evrensel olarak tanımlanmış ve standardlaştırılmış bir özellik olmayıp genelde iş parçası malzemesinden kesici bir takım ile talaş kaldırılması anında (yani talaşlı imalat esnasında) iş parçası malzemesinin davranışı olarak tanımlanabilir. Başka bir ifadeyle “talaş kaldırarak iş parçası malzemesini şekillendirmenin nispi kolaylığı veya zorluğu” olarak tanımlanabilir (63).

Maliyetin düşürülmesine yönelik yapılan çalışmaların sonucu olarak talaşlı imalat işlemini azaltmak için çeşitli yöntemler geliştirilmiş (örnek olarak tam ve yakın geometride üretim, modifiye edilmiş döküm) olmakla birlikte bu yöntemler oldukça sınırlıdır ve ayrıca talaşlı imalat ile elde edilebilecek iyi bir yüzey kalitesi çoğu parçalar için gereklidir (5,12,64).

Talaşlı imalat işleminde iş parçası malzemelerinin işlenebilirliğinin ve kesici takımların kesme performanslarının artırılması çok sayıda bilimsel araştırmanın konusu olmuştur.

Geleneksel malzemelere göre üstün özelliklere sahip yeni yüksek performanslı malzemelerin ve alaşımların (örnek olarak, süper alaşımlar ve kompozit malzemeler) geliştirilmesi araştırmacıları bu yeni geliştirilen malzemelerin işlenebilirlik problemlerine yönlendirmiştir (61).

3.2. İşlenebilirlik

İşlenebilirlik, uygun kesici takım ve kesme parametreleri kullanılarak bir malzemeyi (çoğunlukla metal) talaşlı imalat yöntemleriyle şekillendirebilmenin nispi kolaylığı veya zorluğudur (14). İşlenebilirlik, ekseriyetle malzemenin özgül bir özelliği olarak algılansa da, işlenebilirlik sadece işlenen malzemeye bağlı olmayıp aynı zamanda işleme yöntemi ve işleme parametrelerine de bağlıdır (15).

İşlenebilirliği değerlendirmek için çeşitli kriterler kullanılır. Bunlardan en yaygın olanları:

1. Takım ömrü;
2. Kesme kuvvetleri ve harcanan enerji veya güç;
3. İşlenen yüzey kalitesidir (62).

Malzemelerin işlenebilirliklerini etkileyen malzeme özellikleri sertlik, süneklik, ısı iletkenlik, pekleşme, malzeme içindeki inklüzyonlar ve malzemenin kimyasal bileşimidir. 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 (built-up-edge - BUE) oluşumu gerçekleştiği için yüzey kalitesi kötüleşir ve takım ömrü kısalmır. Çok düşük sertlik talaşlı imalat işleminin performansını kötü yönde etkileyebilir. Örnek olarak, nispeten düşük sertliğe sahip düşük karbonlu çeliğin işlenmesinde kötü yüzey kalitesi oluşur ve talaş uzaklaştırılması ile ilgili problemlerle karşılaşılır. Bu nedenle, düşük karbonlu çeliklerde yüzey sertliğini artırmak ve talaş kırılmasını sağlamak için ekseriyetle 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 artıracak için, artan dayanımla metal kesme işlemi zorlaşır. Bununla birlikte, yüksek ısı iletkenlik kesme bölgesinden oluşan ısının hızlı olarak uzaklaştırılması demektir. Bu nedenle, yüksek ısı iletkenlik işlenebilirlik yönünden genelde faydalıdır (65).

Ayrıca, bir malzemenin kimyasal bileşimi, maruz kaldığı ısı işlem ve içerisindeki inklüzyonlar işlenebilirlik özelliğini önemli ölçüde etkiler ve bazı durumlarda kimyasal bileşim takım üzerinde etkin olan aşınma mekanizmalarını da belirler (14,63).

3.3. Talaşlı İmalat İşlemi

Talaşlı imalat işlemi, bir iş parçası üzerindeki fazlalıkları uygun kesici takım ve takım tezgahı kullanarak uzaklaştırmaktır. İş parçası metal olduğu zaman işlem metal kesme olarak da isimlendirilir. Talaşlı imalat işleminde etkin olan kesme hareketi iş parçasının kesici takım önündeki plastik deformasyonunu ve deforme olan bu katmanın talaşa dönüşmesini gerektirir. Bu yöntem çoğunlukla metalleri şekillendirmek için uygulansa da diğer bazı malzemeler de aynı yöntemle şekillendirilebilir (14,15).

Aşağıdaki sebepler dikkate alındığında talaşlı imalat işleminin en önemli imalat yöntemlerinden biri olduğu anlaşılır:

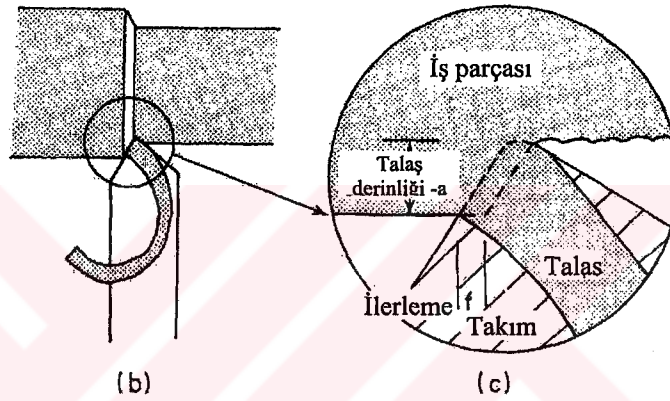
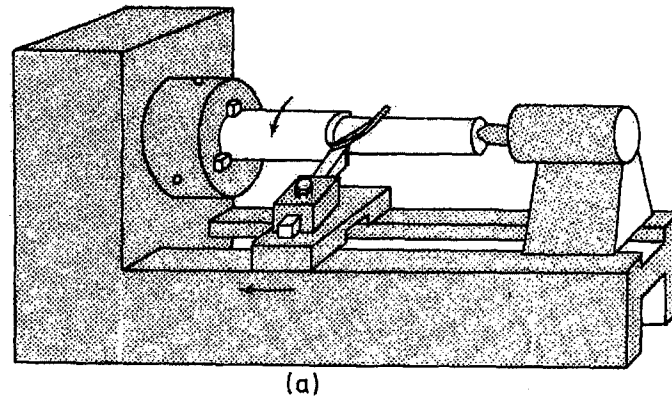
1. Çok çeşitli malzemeler talaşlı imalat yöntemiyle şekillendirilebilir. Gerçekte bütün katı malzemeler işlenebilir. Polimer ve polimer esaslı kompozitler de talaşlı imalat yöntemiyle işlenebilir.
2. Talaşlı imalat işlemiyle düz ve dairesel yüzeyler gibi düzenli geometriler oluşturulabilir. Birkaç talaşlı imalat işlemi sırayla uygulanarak hemen hemen bütün karmaşık geometriler elde edilebilir.

3. Talaşlı imalat işlemiyle iş parçası ölçüleri çok yakın toleranslarda elde edilebilir ve çok iyi yüzey kalitesi elde edilebilir (14).

Farklı geometrilerdeki iş parçalarını talaşlı imalat yöntemiyle şekillendirebilmek için çeşitli talaşlı imalat işlemleri ve bu işlemlere özgü takım tezgahları geliştirilmiştir.

Tornalama işlemi talaşlı imalat ile ilgili yapılan deneysel çalışmalarda en çok kullanılan talaşlı imalat yöntemidir. Etkin bir talaşlı imalat işlemi olan tornalama işlemi dairesel iş parçalarının işlenmesinde kullanılır. İşlenecek olan iş parçası genelde bir aynaya bağlanarak döndürülür. Bir takım tutucu üzerine rijit olarak bağlanmış kesici takım dönen iş parçası ekseninde ilerletilerek ve iş parçasından bir katman kaldırılarak, dairesel veya daha karmaşık profilli yüzeyler oluşturulur. Şekil 3.1 torna tezgahı ve tornalama işlemini şematik olarak göstermektedir.

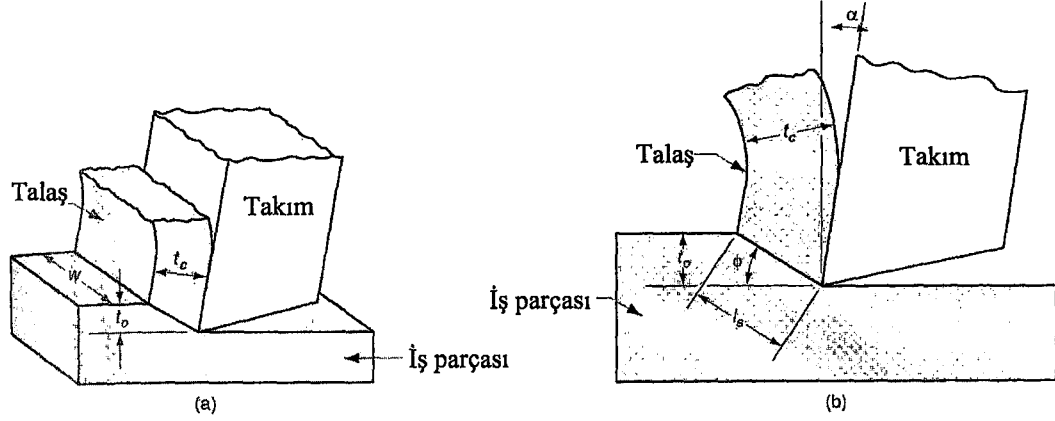
Kesme hızı, (V) kesilmemiş iş parçası yüzeyindeki bir noktanın kesici takım önünde birim zamanda aldığı yol olarak tanımlanır ve çoğunlukla m/min olarak ifade edilir. İlerleme hızı (f), iş parçası malzemesinin her bir dönüşünde kesici takımın iş parçası eksenine paralel olarak kat ettiği mesafedir. Talaş kalınlığı (a), iş parçası malzemesinden kaldırılan malzemenin derinliğidir ve iş parçası eksenine dik yönde ölçülür. Bu üç kesme parametresinin çarpımıyla ekseriyetle metal kesme işleminin verimliliğini ifade eden talaş kaldırma oranı bulunur (66).



Şekil 3.1. Torna tezgahı ve tornalama işleminin şematik olarak gösterimi (66)

3.4. Talaşlı İmalat Mekanîği ve Talaş Oluşumu

Talaşlı imalat işleminin mekanîği ve talaş oluşumu üzerine yapılan analizlerde genellikle iş parçası olarak metaller dikkate alınmıştır (14,62). Bununla birlikte, metal dışı olan malzemelerin işlenmesinde de benzer kurallar uygulanabilir. Talaşlı imalat işlemi gerçekte üç boyutlu ve oldukça karmaşık olduğu için talaşlı imalat işleminin mekanîğinin tanımlanmasında iki boyutlu dik kesme (orthogonal) modeli kullanılır (Şekil 3.2). Bu yaklaşım basit olmakla birlikte talaşlı imalat mekanîğini yeterli doğrulukta tanımlar. İki boyutlu dik kesme modeli talaşlı imalat işleminin analizinde önemli bir oynar. Bu modele göre, iş parçasının kesici takımı zorlamasıyla kayma düzleminde iş parçasının kayma gerilmesinin aşılmasıyla talaş oluşumu gerçekleşir (14).



t_0 : deforme olmamış talaş kalınlığı

t_c : deforme olmuş talaş kalınlığı

w : iş parçası genişliği

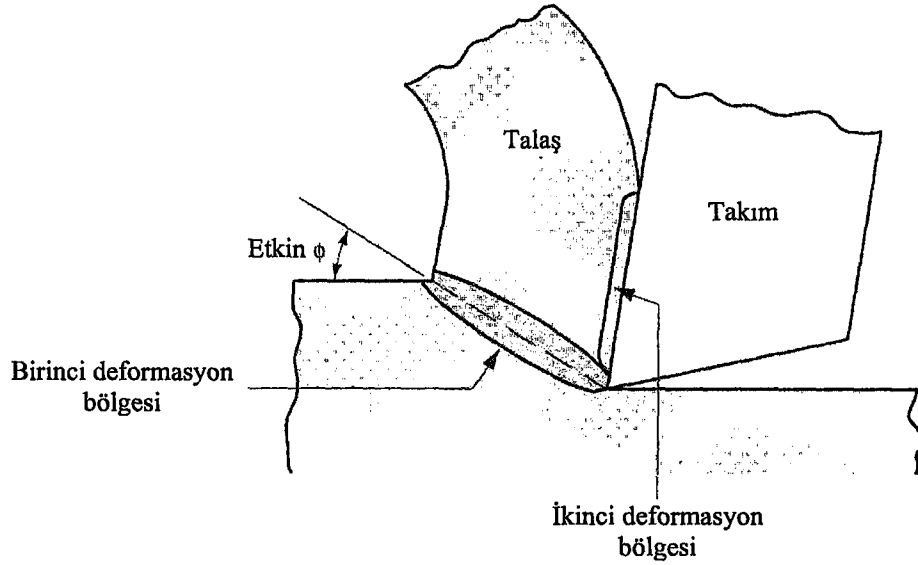
l_s : kayma düzlemi uzunluğu

ϕ : kayma düzlemi açısı

α : kesici takım talaş açısı

Şekil 3.2. Dik kesme modeli (14)

Gerçekte ise talaş oluşumu ince bir bölgede gerçekleşir, Şekil 3.3. Talaş oluşumu plastik deformasyonun önemli derecede rol oynadığı bir işlemdir. Talaşlı imalat işleminde talaş oluşumu, iş parçasının kesici takım önündeki bölgesel deformasyonu ile gerçekleşir. İş parçası ve kesici takım arasındaki nispi hareket sonucu iş parçasında oluşan gerilme iş parçasını birinci deformasyon bölgesinde plastik deformasyona uğratarak talaş oluşumunu gerçekleştirir. Oluşan talaş, kesici takımın talaş yüzeyi üzerinden geçerek atılır. Birinci kayma (deformasyon) düzleminde oluşan talaş kesici takımın talaş yüzeyi üzerinden geçerken kayma veya yapışma sonucu ikinci defa deformasyona uğrar ve kesme bölgesinden atılır.



Şekil 3.3. Gerçek talaş oluşumu (14)

3.5. Takım-Talaş Arayüzeyi 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 takımla 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 (66). Bu bölgede yüksek basınç ve sıcaklıktan dolayı iki yüzey birleşerek metalin kayma hareketini durdurur fakat takım-talaş arasındaki hareket devam ettiğinden dolayı arayüzeyde 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 3.3).

Arayüzeyde yapışma sonucu akma bölgesi daima kesici takım yüzeyinde oluşmaz. Alternatif bir özellik olan yığıntı talaş, talaşlı imalat işlemlerinde sıkça görülür.

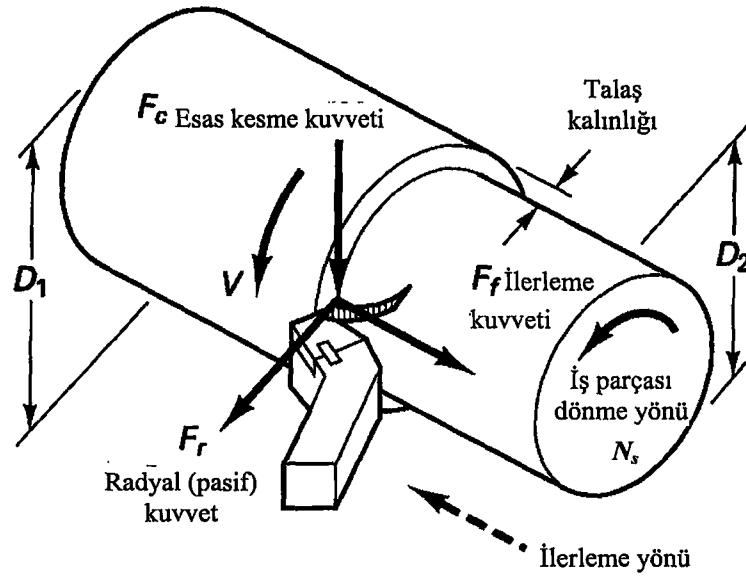
Çoğunlukla orta seviyedeki kesme hızlarında görülen yığıntı talaş, yapılarında birden fazla faz bulunduran alaşımların işlenmesinde, pekleşen iş parçası malzemesinin kesici takım talaş yüzeyinde ve kesici uç etrafında kümelenerek talaşın kesici takımla doğrudan temasını engeller. Yığıntı talaş oluşumu ile, yoğun ve hızlı kayma deformasyonu takım yüzeyinden yığıntı talaş yüzeyine taşınır (66).

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 (63). Bazı durumlarda yığıntı talaş kesici uç üzerinden iş parçası malzemesine doğru çıkıntı oluşturarak talaş derinliğini artırır ve bu çıkıntı düzensiz bir yapıya sahip olacağı için yüzey pürüzlülüğünü artırır (67).

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 (63).

3.6. 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 (66-68). Tornalama işlemi esnasında oluşan kuvvetler Şekil 3.4'te şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.4. Tornalama işleminde kesme kuvvetleri (15)

Burada kesme kuvvetinin üç bileşeni mevcuttur.

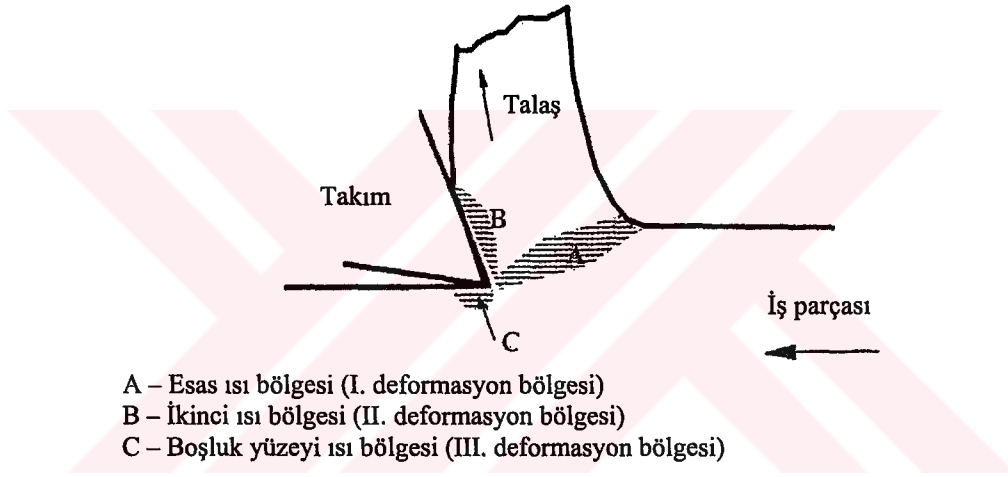
1. Esas kesme kuvveti (F_c): Kesme hızı yönünde etki eder . En büyük kuvvet olup metal kesme işleminde harcanan gücün genelde % 99'una karşılık gelir.
2. İlerleme kuvveti (F_f): Kesici takımın ilerlemesi yönünde etkiyen kuvvettir. Kesme kuvvetinin ekseriyetle yaklaşık % 50'si kadardır fakat ilerleme hızının kesme kuvvetiyle karşılaştırıldığında çok küçük olduğu için metal kesme işlemindeki gerekli gücün çok az bir kısmına karşılık gelir.
3. Radyal kuvvet (F_r): İşlenen yüzeye dik etkiyen kuvvettir. Bu kuvvet de ilerleme kuvvetinin yaklaşık % 50'si kadardır (15).

Bileşke kuvvet bu üç kuvvetin vektörel olarak toplanması ile elde edilir ve aşağıdaki eşitlikle hesaplanır:

$$F = \sqrt{F_c^2 + F_f^2 + F_r^2} \quad [3.1]$$

3.7. Talaşlı İmalat İşleminde Isı ve Sıcaklık

Talaşlı imalat işleminde kullanılan güç ($F_c V$) ekseriyetle 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 (67). Oluşan ısı sonucu sıcaklık artışı kesici takım performansını ve iş parçası kalitesini etkiler (63). Kesme bölgesinde ısı üretme kapasitesine göre ısı oluşturan üç bölge vardır (Şekil 3.5):



Şekil 3.5. Kesme bölgesinde ısı oluşumu (61)

- A - Kayma düzlemi; buradaki plastik deformasyon önemli bir ısı kaynağı olup oluşan ısının çoğu talaşta kalır.
- B - Takım-talaş arayüzeyi 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 (15).

Isının takım aşınması ve takım ömrü üzerinde doğrudan bir etkisi vardır ve kesme hızının artışı sınırlandırır. Oluşan ısının 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 (67).

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 (67).

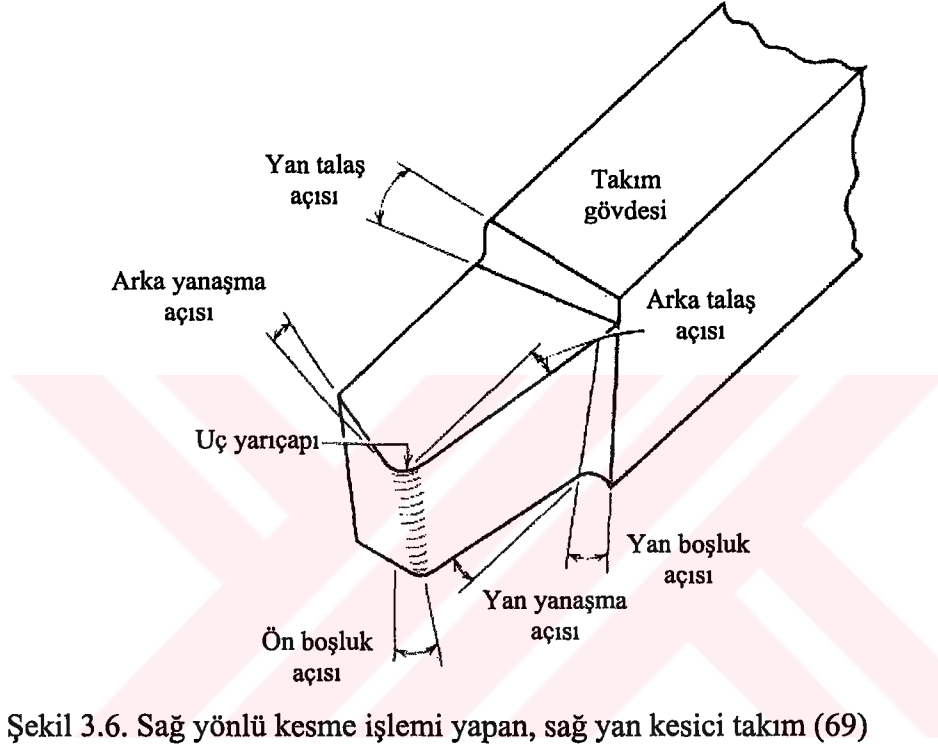
Aşırı sıcaklık, kısa takım ömrü ve kesme hızını sınırlandırmanın ana sebebidir. Kesici takım malzemelerinin geliştirilmesi büyük bir oranda yüksek sıcaklık etkilerine dayanabilmeleri etrafında odaklanmıştır. Kesme bölgesindeki sıcaklık büyük oranda takım ile talaş arasındaki temas, kesme kuvvetlerinin 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. Isıнын çoğu kayma bölgesinden kaynaklanır ve bu nedenle takım ve talaş arasındaki temasın ölçüsü performansı etkiler. Küçük talaş açılardan kaynaklanabilen küçük kayma açıları iş parçasına iletilen ısı miktarını artırabilir (63).

3.8. Kesici Takım

3.8.1. 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 (14). Şekil 3.6’da tek noktadan, sağ yönlü kesme (sağ yan) işlemi yapan bir kesici takım görülmektedir.



Şekil 3.6. Sağ yönlü kesme işlemi yapan, sağ yan kesici takım (69)

3.8.2. 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 (63):

- yüksek sertlik ve sıcak sertlik,
- yüksek tokluk,
- iş parçasına karşı kimyasal olarak asallık,
- oksidasyon ve kimyasal olarak çözünmeye (dissolution) karşı kararlılık,
- ısıl şoklara karşı direnç.

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

3.8.2.1. 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 (66).

3.8.2.2. 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 (66).

Çelik ve WC-Co arasındaki güçlü bir kimyasal reaksiyondan dolayı takım-talaş arayüzeyinde 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 (14,66).

İki tür sementit karbürün genel özellikleri benzer olup aşağıdaki gibidir:

- 1) yüksek basma dayanımı, düşük veya orta seviyede çekme dayanımı,
- 2) yüksek sertlik (90-95 HRA),

- 3) yüksek sıcak sertlik,
- 4) iyi aşınma direnci,
- 5) yüksek ısı iletkenlik,
- 6) yüksek elastikiyet modülü,
- 7) yüksek hız çeliğinden düşük tokluk (66).

Çelik dışı malzemelerin işlenmesinde 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 (66).

3.8.2.3. 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 (14).

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 Al_2O_3 uygulanması yaygındır (14).



3.8.2.4. 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 (15,63).

3.8.2.5. Seramik

Seramik kesici takımlar esas olarak alüminyum oksit (Al_2O_3) ve silisyum nitrür (Si_3N_4) 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 ısıl şok direnci ve kırılma tokluğu özellikleri sergilerler. Al_2O_3 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 (63).

Üretimlerindeki ve sinterlenmelerindeki iyileştirmelerle ve tokluklarını artırıcı çeşitli elementlerin katılmasıyla seramik kesici takımlar daha iyi dayanım, ısıl şok direnci ve kırılma tokluğu gibi özelliklere sahip olmuşlardır ve dolayısıyla uygulama alanları genişlemiştir (63).

3.8.2.6. Çok sert kesici takımlar

Doğal elmas (tek kristalli), çok kristalli elmas (polycrystalline diamond - PCD) ve kübik bor nitrit (cubic boron nitride - CBN) 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 ısıl 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 (14,66).

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 (66).

Çok kristalli elmas (PCD) kesici takımlar yapay elmasın grafitik karbondan çok yüksek sıcaklık ve basınç altında üretiminden sonra kullanılmaya başlanmıştır. Çeşitli boyut ve şekillerde üretilen elmas parçacıklar 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 PCD, sementit karbür alt katman üzerinde kesici takım olarak kullanılır (15).

PCD kesici takımlar rasgele yönlenmiş elmas parçacıklarından oluştuğu için çoğu uygulamalarda izotropik davranış sergilerler. Doğal elmastan elde edilebilecek kadar mükemmel bir kesici ucun PCD 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 (66). 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 (66).

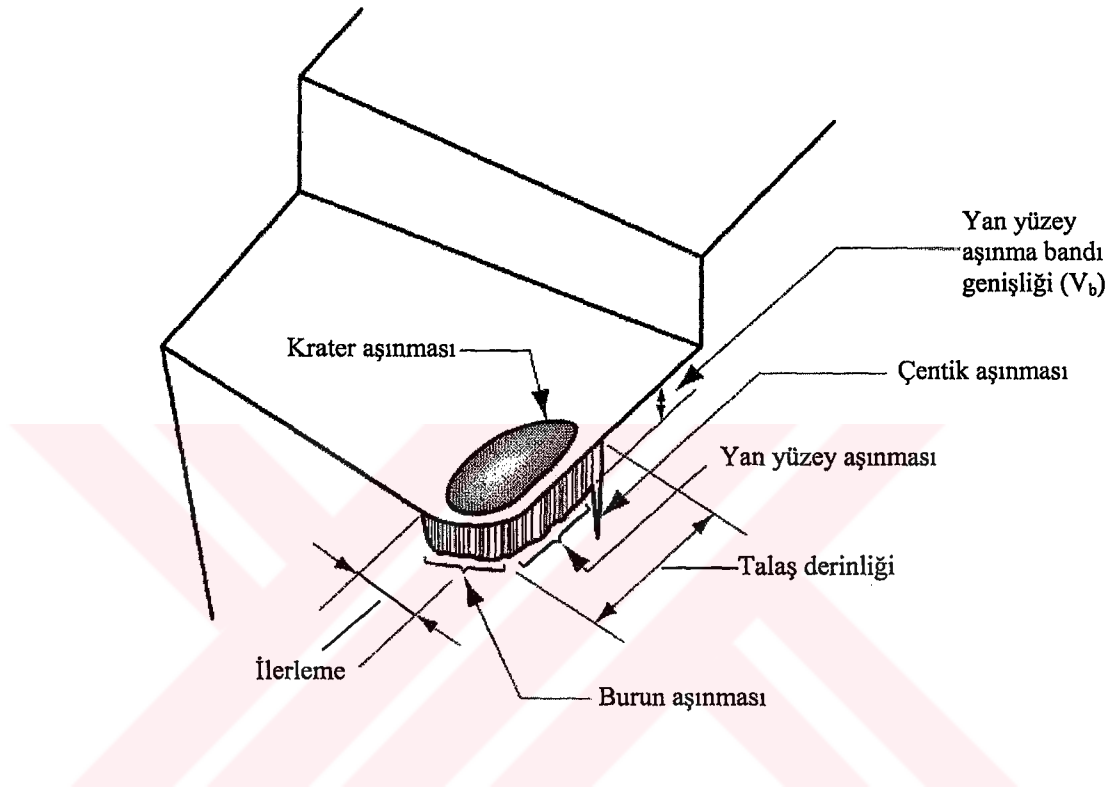
Yapay elmas üretiminde kullanılan aynı teknoloji ile hekzagonal bor nitritten CBN üretimi gerçekleştirilmiştir. 3500 – 4500 VSD sertliği ile elmastan sonra sertlikte ikinci sırada yer alır. 1100 °C sıcaklıkta sertliği 1800 – 2000 VSD olup sementit karbürün oda sıcaklığındaki sertliğine tekabül eder. Mükemmel aşınma direnci, iyi ısı iletkenliği, düşük sürtünme ve ısıl genleşme katsayıları diğer özellikleridir (66).

PCD kesici takımlarda olduğu gibi CBN parçacıkları çok yüksek basınçlar kullanılarak kesici takım haline getirilir. Yoğunluğunu artırmak için başlangıç parçacıklarına bir miktar metal tozu ilave edilir. CBN demir, kobalt ve nikel esaslı malzemelerin işlenmesinde kullanılır. Titanyum, alüminyum ve zirkonyum gibi nitrit ve bor oluşturan elementlerle reaksiyona girer (66).

3.9. Takım Aşınması

Hemen hemen bütün talaşlı imalat işlemleri esnasında kesici takımlar belirli bir süre sonra etkin olarak kesme kabiliyetlerini kaybederler. Şekil 3.7 kesici bir takım üzerindeki aşınmaları şematik olarak göstermektedir. 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 (14,66).



Şekil 3.7. Kesici takımdaki aşınmaların şematik olarak gösterilmesi (14)

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,
- işlenen malzeme boyutlarındaki değişim,
- işlenen yüzeyin bozulması (61).

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

- 1- 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 (61).
- 2- 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 (63).
- 3- 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. 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 (14,63).

3.10. İşlenebilirlikle ilgili Literatür Araştırması

3.10.1. Metal matrisli kompozit malzemelerin işlenebilirliği

Döküm, dövme, ekstrüzyon vb. yöntemlerle üretilen MMK malzemeler kullanılacağı yerlerde fonksiyonlarını yerine getirebilmeleri için genellikle talaşlı imalat

işlemlerine maruz kalırlar. Bu işlemler sayesinde daha iyi bir yüzey kalitesi ile birlikte gerekli geometrik ve ölçü toleransları sağlanır. Parçacık takviyeli MMK malzemeler üstün mekanik ve ısı özelliklere sahip olmakla birlikte, bu malzemelerin kötü işlenebilirlikleri endüstride yaygın olarak kullanılmalılarını engellemektedir (70-74).

MMK malzemelerin içerisindeki seramik takviye elemanları genellikle talaşlı imalatla yaygın olarak kullanılan sementit karbür kesici takımların tanelerinden daha sert olduğu için talaşlı imalat esnasında sementit karbür kesici takımlarda hızlı abrasif yan yüzey aşınmasına sebep olmaktadır veya daha uzun bir takım ömrü elde etmek için de MMK malzemelerdeki seramik parçacıklardan daha sert taneler içeren Çok Kristalli Elmas (PCD) gibi kesici takımlara ihtiyaç duyulmaktadır. Sementit karbür kesici takımların çok kısa sürede aşınması ve PCD kesici takımların pahalı olması MMK malzemelerin işleme maliyetlerini yükseltmektedir. Dolayısıyla ekonomik bir işlenebilirlik için kesici takımın ve kesme parametrelerinin iyi belirlenmesi MMK malzemelerin işlenmesinde yüksek işleme maliyetini düşürmek için oldukça önemlidir.

MMK malzemelerin işlenmesi konusunda yapılan ilk çalışmalar yüksek hız çeliği takımların bu malzemelerin işlenmesinde yetersiz olduğunu ve kabul edilebilir bir takım ömrü için daha sert kesicilere ihtiyaç olduğunu göstermiştir (2,5,75,76).

Parçacık takviyeli MMK malzemelerin işlenmesiyle ilgili yapılan ilk çalışmalardan biri Brun et al.'a (77) aittir. Bu çalışmada % 40 SiC parçacık takviyeli 6061 alüminyum matrisli MMK malzeme seramik, sementit karbür, CBN ve PCD kesici takımlar kullanılarak tornalanmıştır. Kesici takım yan yüzey aşınmasının kesici takım sertliğiyle ters orantılı olduğu görülmüştür. Kullanılan bütün takımlar arasından PCD'nin 152 m/min'de kabul edilebilir takım ömrü sağladığı ve 152 m/min'den düşük kesme hızlarında takım ömrünün önemli derecede arttığı görülmüştür.

Weinert and König (78), % 20 Al_2O_3 kısa elyaf, % 20 SiC parçacık ve % 10 B_4C parçacık ile takviyeli çeşitli alüminyum alaşımları MMK malzemelerin işlenmesinde takviye elemanının ve kesici takımın tanelerinin boyutlarının ve sertliklerinin kesici takım aşınması üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. İnce, orta ve kaba taneli üç farklı sementit karbür ile 10 ve 20 μm boyutlarında parçacıklardan oluşan iki farklı PCD (PCD 010 ve PCD 025) kesici takımlar kullanılmıştır. Bu çalışmadan takım aşınması üzerindeki en belirgin faktörün takviye elemanının sertliği olduğu ve esas kesici takım aşınma mekanizmasının abrasyon olduğu görülmüştür. B_4C takviye elemanının hacim oranı sadece % 10 olmasına rağmen, diğer iki takviye elemanından daha sert olduğundan dolayı kesici takım B_4C takviyeli MMK malzemenin işlenmesinde daha fazla yan yüzey aşınmasına maruz kalmıştır.

$\delta-Al_2O_3$ 'le takviye edilmiş MMK malzemenin işlenmesi ile SiC ve B_4C ile takviye edilmiş MMK malzemelerin işlenmesinde oluşan takım aşınmaları arasında büyük bir fark görülmüştür. $\delta-Al_2O_3$ takviye elemanın sertliği WC içeren sementit karbür kesici takımlardan daha düşük olduğundan dolayı $\delta-Al_2O_3$ elyaflar veya elyafların bir kısmının mikro kesme ile sementit karbür kesici takımı aşındıramadığı görülmüştür. Bundan dolayı, burada takım aşınmasının sementit karbür kesici takımlardan mikro kırılma veya yorulma ile ayrılan serbest WC parçacıklarının talaş, iş parçası ve kesici takım arasındaki sürtünme etkisi takım aşınmasına yol açmıştır. SiC ve B_4C takviyeli MMK malzemelerin işlenmesinde ise bu takviye elemanlarının sertliklerinin WC'den daha fazla olduğundan dolayı kesici takım yan yüzeyinde oluşan olukların sementit karbürlerin bu sert parçacıklar tarafından mikro kesilmesi sonucu oluştuğu anlaşılmıştır. $\delta-Al_2O_3$ takviyeli MMK malzemenin işlenmesinde ince taneli sementit karbür kesici takımlar daha üstün performans gösterirken SiC ve B_4C takviyeli MMK malzemelerin işlenmesinde büyük taneliler daha iyi performans göstermiştir.

Aynı malzemelerin PCD takımlarla işlenmesinde PCD kesici takımlar sementit karbürlere göre mükemmel performans göstermiştir. Kesme hızı sementit karbürle işlenirken kullanılan 100 m/min'den 500 m/min'te çıkarılmasına rağmen PCD kesici takımlar sementit karbürlere göre daha az aşınma göstermiştir. Takviye elemanı

sertliğinin PCD kesici takımın aşınma davranışı üzerindeki etkisi sementit karbür kesici takımın üzerinde oluşturduğu etkiye benzer olmuştur. Fakat, takviye elemanı sertliğine bağlı olan aşınma hızı farklılığı çok fazla olmamıştır. Sementit karbür kesici takımlardaki gibi, PCD kesici takımın tane büyüklüğünün etkisi takviye elemanı sertliğine bağlı olarak değişmiştir. δ - Al_2O_3 takviyeli MMK malzemenin orta ve kaba taneli PCD kesici takımlar ile işlenmesinde yan kenar aşınma hızlarında hemen hemen hiç farklılık görülmemiştir. Fakat, SiC ve B_4C ile takviye edilmiş MMK malzemelerin işlenmesinde kaba taneli PCD025 kesici takım kullanılmasıyla aşınma hızı azalmıştır. PCD025'in aşınma direnci PCD010'dan daha iyi bulunmuştur. SiC ve B_4C 'nin PCD'den daha düşük sertliğinden dolayı aşınma mikroçatlaklar ve yorulma sonucu oluşmuştur.

Tomac ve Tonnessen (75), % 14 hacim oranında SiC takviyeli Al matris kompozitin işlenmesinde takım aşınması, kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülüğünü incelemişlerdir. Kaba işleme için çok katmanlı kaplamalı sementit karbür kesici takımlar ve ince işleme için de PCD kesici takımlar kullanılmıştır. PCD ile sementit karbür kesici takımlar aynı kesme şartlarında takım ömrüne göre karşılaştırılmışlardır (Kesme hızı: 60 m/min, talaş derinliği: 0.4 mm ve ilerleme: 0.1 mm/rev) ve PCD kesici takımda 0.4 mm aşınan bölge oluşması için 62 dakika geçmiştir. Kaplanmış sementit karbür kesici takımda aynı miktarda takım aşınmasına ulaşılması için sadece 2 dakika geçmiştir.

MMK malzemenin PCD kesici takımla işlenmesinde yüzey pürüzlülüğü artan ilerleme ve kesme hızlarıyla artmıştır. Yüzey pürüzlülüğünün artan kesme hızı ile artmasının sebebi artan sıcaklık nedeniyle SiC parçacıklar ve Al matris arasındaki bağın zayıflamasına ve dolayısıyla bu da kesici takımın kırılğan parçacıklarla temasa geçtiğinde bu parçacıkları kesmekten ziyade malzeme içerisine itmeye çalışması sonucu iş parçası yüzeyinde olukların oluşmasına atfedilmiştir.

PCD kesici takımların yüksek maliyeti işleme operasyonunun maliyetini artıracak ve bu yüzden, az sayıda parçaların işlenmesi için K10 sementit karbürün muhtemel bir çözüm olabileceğini ve sementit karbür kesici takımlarla işlerken yeterince uzun

bir takım ömrü sağlamak için kesme hızları 20-50 m/min gibi düşük değerlerde olması gerektiği belirtmiştir. İlerlemenin artmasıyla kesme bölgesinde ısının arttığı ve dolayısıyla matrisin sertliğinin azalması sonucu SiC parçacıkların iş parçasının içerisine doğru itilmesi sonucu takım aşınmasının azaldığı görülmüştür. Kabul edilebilir bir yüzey elde etmek koşuluyla mümkün olan en yüksek ilerleme hızı, kesme zamanını azaltmak ve kaldırılan talaş miktarını artırmak için bu çalışmada tavsiye edilmiştir.

Artan ilerleme hızıyla sementit karbür kesici takımların yan yüzey aşınmasının sabit bir miktar talaş kaldırılması durumunda azalacağı Chambers ve Stephens (79) tarafından da %5 Saffil ve %15 SiC parçacık takviyeli Al-5Mg alaşımı MMK malzemenin işlenmesinde gözlemlenmiştir. Dolayısıyla, parçacık takviyeli MMK malzemelerin kaba işlenmesinde ilerleme hızının artırılmasıyla takım ömrünün ve dolayısıyla kaldırılan talaş miktarının artırılmasının mümkün olduğu belirtilmiştir. Benzer şekilde talaş derinliğinin 1 mm'den 4 mm'ye çıkarılmasıyla aşınmada kayda değer bir artış kaydedilmemiştir. Sementit karbür kesici takımlarla endüstriyel olarak kabul edilebilir bir takım ömrünün düşük kesme hızı ve yüksek ilerleme miktarında elde edilebileceği bu çalışmada da belirtilmiştir.

İşlenmiş yüzeylerde yüzey pürüzlülüğü ölçümleri gerçekleştirilmiştir. R_a değerine göre PCD ile işlenen yüzeyin pürüzlülük değeri K10 kalitesinde sementit karbür ile elde edilen yüzeyden daha yüksek çıkmıştır. Ortalama pürüzlülük değeri R_a 'nın yüzey kalitesinin gerçek bir ölçüsü olmadığı belirtilmiştir. Yüzeylerin tarama elektron mikroskobu ile incelenmesiyle sementit karbür kesici takımın SiC parçacıkları kesememesi yüzeyde yoğun deformasyondan dolayı sıvanmaya ve görünürde daha düzgün bir yüzey elde edilmesini sağlamıştır. Bununla birlikte PCD kesici takımla işlenen yüzeyde parçacıkların da kesilebildiği için ilerleme izleri rahatlıkla görülebilmektedir.

Chambers (80) daha önce yaptığı bir başka çalışmada % 5 hacim oranında Saffil ve % 15 hacim oranında SiC takviyeli Al-5Mg matrisli MMK ile % 15 SiC takviyeli Duralcan A356 matrisli MMK malzemenin işlenebilirliklerini karşılaştırmıştır.

Deneylerde sementit karbür ve PCD kesici takımlar kullanılmıştır. En uygun sementit karbür kalitesini (grade) bulmak için ön testler yapılmış ve takım ömrü ve bitirme yüzeyine göre kaplanmış K10 kalitesinde sementit karbür takım en uygun takım olarak bulunmuştur.

Hung et al. (81), yaptıkları çalışmalarında soğuk izostatik preslenmiş ve daha sonra sıcak ekstrüzyona tabi tutulmuş %10-20 ağırlık oranında SiC takviyeli Al-Li matrisli MMK malzemenin farklı kesme şartlarında işlenmesinde kesicinin performansını tahmin edebilmek için tornalama işlemini, Taylor takım ömrü denklemini kullanarak modellemişlerdir. Öncelikle, oluşturulan modeller çeliğin işlenmesinde doğrulanmış daha sonra da MMK malzemeye uygulanmıştır.

İşlenen parçaların yüzey altındaki hasarları mikrosertlik ölçümleriyle ve kimyasal olarak dağlanmış iş parçası numunelerinin mikro yapıları incelenerek yapılmıştır. CBN ve PCD takımların SiC parçacıkları kristal düzlemlerinden kırarak matrise az zarar verdiği ve bunun yanında sementit karbür kesici takımların parçacıkları sadece matristen kırarak ayırmadığı aynı zamanda matrisi önemli derecede deformasyona uğrattığı görülmüştür.

Looney et al. (82), % 25 hacim oranında SiC takviyeli alüminyum alaşımı MMK malzemenin çeşitli sementit karbür, seramik ve CBN kesici takımlarla tornalanması sonucu her bir kesici takımda kesme hızının takım aşınması, bitirme yüzeyi ve kesme kuvvetleri üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Kullanılan kesme hızları 17-118 m/min ve ilerleme hızları 0.48 ve 0.24 mm/rev olarak belirlenmiştir. CBN kesici takımlar aşırı sertliklerinden ve dolayısıyla yüksek aşınma dirençlerinden dolayı diğer takımlara göre oldukça düşük aşınmaya maruz kalmışlardır. Bununla birlikte, silisyum nitrit (Kyon) seramik kesici takım çok fazla aşınmaya maruz kalmıştır.

Ölçülen ortalama yüzey pürüzlülük değerlerinin, aşağıdaki eşitlikle hesaplanan teorik değerlerden daha iyi olduğu görülmüştür.

$$R_a = 0.0321f^2/r \quad [3.2]$$

burada; f , ilerleme hızı (mm/rev) ve r ise kesici takım uç yarıçapıdır (mm). Yüksek kesme hızlarında yüzey pürüzlülüğündeki görünür iyileşmenin sebebi bu yüksek hızlarda yığıntı talaşın kırılması ve aşırı takım aşınması sonucu takım uç yarıçapının artmasıyla açıklanmıştır.

Looney et al. (82) yaptıkları bu çalışmada MMK malzemenin sementit karbür kesici takımlarla işlenmesinde, artan kesme hızıyla kesme kuvvetlerinde de artış görülmüştür. Bunun sebebi aşırı takım aşınmasıyla açıklanmıştır. Çünkü aşırı takım aşınmasıyla talaş derinliği azalsa bile aşırı takım aşınması kesici takımda keskin bir kesici uçtan daha geniş bir kesme yüzeyi oluşturmuştur. Böylece kesici takım/iş parçası arayüzeyindeki sürtünme kuvvetleri artmıştır.

Günümüze kadar yapılan çalışmalar genelde kesme işlemine başladıktan kısa bir süre sonra kesme kuvvetlerinin artan kesme hızıyla düştüğünü göstermektedir. Bu durum, kesme hızının artmasıyla sıcaklığın artmasına ve dolayısıyla artan sıcaklık nedeniyle kesici takım talaş yüzeyindeki temas alanının azalması ve kısmen de akma bölgesinde (ikinci deformasyon bölgesi) kayma dayanımının azalmasıyla açıklanmaktadır (66). Tomac and Tonnessen (75), % 14 hacim oranında SiC takviyeli Al matris MMK malzemenin sementit karbür ve PCD kesici takımlar ile işlenmesinde kesme kuvvetlerini ölçmüşlerdir. Genel eğilimin aksine hızlı takım aşınması sebebiyle ilerleyen işleme süreciyle sementit karbür kesici takımlarla kesme yaparken kesme kuvvetleri artmıştır. Fakat, PCD kesici takımların oluşturduğu kesme kuvvetleri oldukça düşük olmuştur ve hemen hemen artış göstermemiştir.

Quigley et. al. (83), % 25 hacim oranında SiC parçacık takviyeli %0,8 Si ve %0,5 Mn içeren Al alaşımı MMK malzemeleri 5-130 m/min arasındaki kesme hızları ve 0,38 m/min ilerleme hızında işlenebilirliklerini incelemişlerdir. Al/SiC MMK

malzemenin işlenmesinde kaplamaların yüzey pürüzlülüğü ve yan yüzey aşınması üzerindeki etkisini ve ani durdurma tertibatıyla da kesme işleminin mikroyapısını incelenmişlerdir. En üstte TiN olan üç katlı kaplamalı kesici takımın yan yüzey aşınması yönünden en iyi olduğu fakat en kötü yüzey kalitesine neden olduğu görülmüştür. İş parçası/talaş numuneleri SEM ile incelenmiş ve deformasyonun kaymadan ziyade çekme kırılması ile olduğu görülmüştür.

Bu çalışmadan da Looney et al. (82) tarafından yapılan çalışmada olduğu gibi R_a değerleri teorik olarak hesaplanan değerlerden önemli derecede düşük olduğu görülmüştür. Bu davranış aşırı yan yüzey aşınmasına atfedilmiştir. Aşırı yan yüzey aşınmasıyla etkin takım uç yarıçapının artacağı ve R_a değerinin de düşeceği belirtilmiştir. Bu davranışın aynı zamanda en düşük yan yüzey aşınması sergileyen kesici takımların en kötü bitirme yüzeyi oluşturmalarıyla da açıklanabileceği belirtilmiştir.

Yanming and Zehua (84), 2, 14, 42 μm boyutlarında % 15 ağırlık oranında SiC parçacık takviyeli Al matrisli farklı MMK malzemelerin yüksek hız çeliği (HSS), sementit karbür, seramik, PCD ve CBN kesici takımlarla işlenebilirliğini incelemişlerdir. 42 μm parçacık takviyeli SiC/A356'nın 150 m/min kesme hızında, 0,1 mm/rev ilerleme hızında ve 0,1 mm talaş derinliğinde 1 dakika işlenmesi sonucu K01 kalite sementit karbür kesici takımda 0,5 mm maksimum yan yüzey aşınması oluşmuş, 14 μm parçacık takviyeli SiC/A356'nın aynı koşullarda 2 dakika işlenmesinde ise 0,1 mm'den daha az yan yüzey aşınması oluşmuştur. 2 μm SiC parçacık takviyeli A356'nın 52 m/dak kesme hızında, 0,1 mm/rev ilerleme hızında ve 0,5 mm talaş derinliğinde HSS ve M10 kalite kesici takımla 2 dakika işlenmesinde bu kesici takımlarda sadece hafif abrasif oluklar oluşmuş, 79 ve 93 m/min kesme hızlarında da 2 dakika işledikten sonra bile kesici takım ucu keskinliğini korumuştur. K01 kalite sementit karbür takımla 60-285 m/min kesme hızlarında, 0,1-0,2 mm/rev ilerleme hızlarında ve 0,1-1 mm talaş derinliklerinde 12 dakika işlemekle maksimum aşınma sadece 0,1 mm olmuştur. Bu çalışmadan SiC parçacık boyutu takım ömrünü etkileyen en önemli faktör olarak bulunmuştur.

Seramik kesici takımlar bazı malzemelerin işlenmesi için mükemmel bir takım olmasına rağmen, SiC'e göre yeterli sertlikte olmadıkları için ve kırılgan özelliklerinden dolayı kaba taneli SiC takviyeli MMK malzemelerin işlenmesi için uygun bulunmamıştır. Bu malzemelerin işlenmesinde, SiC parçacıkların seramik kesici takımlarda hızlı bir şekilde abrasif aşınma gerçekleştiremeyeceği ancak kaba SiC parçacıkların darbelerine maruz kaldığı zaman bu kesici takımlarda yüksek kırılganlıklarından dolayı kırılmaların kolay olacağı ifade edilmiştir. Kaba taneli SiC parçacık takviyeli MMK malzemeler sadece düşük kesme hızlarında ve ince taneli SiC parçacık takviyeli MMK malzemelerin de yüksek kesme hızlarında işlenmeleri tavsiye edilmiştir. Kesici takım aşınma mekanizmasının sementit karbürler için abrasif aşınma ve yüksek sertlikteki takımlar için de kesici kenar ve köşe kırılmaları şeklinde (chipping) olduğu gözlenmiştir.

Yapılan bir başka çalışmada Li and Seah (85), farklı boyutlarda (15, 38, 53 ve 75 μm) ve farklı oranlarda (ağırlıkça % 2,5, 5,0, 7,5, 10,0, 12,5 ve 15,0) SiC parçacıklar içeren ve sıvı metal karıştırma yöntemiyle üretilmiş Al-2024 alaşımı matrisli kompozit malzemelerin işlenmesinde parçacık oranı ve büyüklüğünün kaplanmış sementit karbür kesici takımların aşınması üzerindeki etkilerini ve takım aşınma mekanizmalarını incelemişlerdir. Parçacık ağırlık oranı ve büyüklüğü ile takım aşınmasının arttığı ve parçacık yüzdesi belirli bir değeri geçtikten sonra abrasif aşınmasının hızlandığı görülmüştür. Takım aşınmasındaki hızlanma, belirlenen oranı (% 5) geçen parçacık yüzdesinde parçacıkların etkileşimiyle açıklanmıştır.

Andrewes et al. (86), SiC takviyeli Al matrisli MMK malzemenin işlenebilirliğini deneysel olarak inceleyerek bu malzemenin işlenmesi esnasında PCD ve CVD elmas kaplamalı sementit karbür kesici takımların aşınma karakteristiklerini belirlemeye çalışmışlardır. İşlenen iş parçası malzemesi % 20 hacim oranında ortalama 12.8 ± 1.0 μm boyutunda SiC parçacık içeren bir MMK malzemedir. Bütün işlenebilirlik deneyleri 190 m/min kesme hızında kuru olarak yapılmıştır. Talaş derinliği 1 mm ve ilerleme hızı 0,1 mm/rev olarak kullanılmıştır. PCD kesici takımın toplam işleme

zamanı 53 dakika ve CVD elmas kaplamalı kesicinin ki ise 19 dakika olarak bulunmuştur. Çeşitli sementit karbür kesici takımlar da kullanılmıştır fakat takım ömrü oldukça kısa olmuştur.

PCD kesici takımdaki aşınmanın başlangıçta iş parçası malzemesi içinde bulunan sert abrasif SiC parçacıklardan kaynaklandığı belirtilmiştir. PCD SiC'den daha sert olduğu için burada oluşan abrasif aşınmanın mikro-kesmeden ziyade mikro-mekanik deformasyonla ilişkili olabileceği belirtilmiştir. Bu aşınmış yan yüzeyin iş parçası malzemesinin adhezyonunu teşvik edeceği ve bu bölgenin üçüncü kesme bölgesinde (takım-iş parçası arayüzeyi) oluşan yüksek basınçtan dolayı çoğunlukla alüminyum filmle kaplanacağı belirtilmiştir ve yapılan EDX analiziyle bu yüzeyin ince bir alüminyum tabakası ile kaplandığı görülmüştür. Bu durumun, abrasif aşınmaya ilave olarak adhesiv aşınma mekanizmasının da kesici takım aşınmasında etkili olduğunu gösterdiği belirtilmiştir. Alüminyum filmin aşınmış yüzeye yapışması ve daha sonra SiC parçacıklarla uzaklaştırılmasıyla bir kısım PCD parçacıklarının da alüminyum filmle beraber kesici takımdan ayrılarak aşınmanın gerçekleştiği belirtilmiştir.

CVD elmas kaplamalı sementit karbür kesici takımda adhesiv aşınma mekanizmasının daha etkin olduğu görülmüştür. Bu durumun az miktarda honlanmış kesici takım ucuna ve parlatılmamış elmas kaplamadan kaynaklanabileceği belirtilmiştir. Ayrıca, CVD kesici takımdaki küçük çatlakların alüminyumun adhezyonunu teşvik ettiği düşünülmüştür. CVD takımın yan yüzeyine yapışan alüminyum filmin yüksek kesme basınçlarıyla daha fazla deforme olup CVD elmas kaplamaya yapışarak elmas kaplama ve sementit karbür altlık arasındaki adhezyon kuvvetini geçerek elmas kaplamayı kesici takımdan ayırıp aşınmayı hızlandığı belirtilmiştir.

MMK malzemelerin PCD kesici takımlarla işlenmesinde bu tür aşınma olduğu El-Gallab ve Sklad (87) ve Conceicao ve Davim (88) tarafından da belirtilmiştir. Lin et al.(89) ise A359/SiCp/20p (ortalama 12,8 μm) Duralcan MMK malzemenin PCD kesici takımla 300, 500 ve 700 m/min kesme hızlarında işlenmesinde düzensiz SiC parçacıkları ve işleme esnasında oluşan serbest parçacıkların iş parçası ve kesici

takım arasındaki iki-gövdeli ve üç-gövdeli abrasif hareketiyle oluştuğunu belirtmiştir.

Hooper et al. ise üç farklı kompozit malzemenin PCD kesici takım ile işlenmesinde iş parçası malzemesinin PCD kesici takıma yapıştığı gözlemlenmiştir ve kesme esnasında bu durumun PCD kesici takımın kobalt birleştiricisinin uzaklaşmasına ve dolayısıyla elmas parçacıkların uzaklaşması yoluyla adhesiv türü aşınmaya neden olabileceğini belirtilmiştir (90).

J. Paulo Davim (91), A356/SiC_p/20 (ortalama 20 µm) MMK malzemeyi PCD ve CVD yöntemiyle elmasla kaplanmış sementit karbür kesici takımlarla işlemiş ve bu kesici takımların performansını karşılaştırmıştır. Andrewes et al.'ın (76) bulgularının aksine bu çalışmada CVD elmas kaplamalı kesici takım performansı PCD kesici takımın performansından oldukça düşük olmuştur. CVD elmas kaplamalı sementit karbür kesici takımlarla deneyler 50, 60 ve 90 m/min kesme hızlarında yapılırken PCD 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 PCD kesici takım için ise 0,25 mm olarak alınmıştır. Her iki kesici takımda da artan kesme hızıyla takım aşınması artmıştır. CVD elmas kaplamalı kesici takımda 4,5 dakika sonra 0,6 mm takım aşınmasına ulaşılmış ve PCD kesici takımda ise 0,25 mm değerindeki takım aşınmasına 45 dakika sonunda ulaşılmıştır. Buradan da PCD kesici takımın 5 kat daha fazla hızda elmas kaplamalı kesici takımdan 10 kat daha iyi performans gösterdiği belirtilmiştir. Ayrıca, 45 dakika sonunda PCD kesici takım yan yüzey aşınması yalnızca 0,25 mm olurken CVD elmas kaplamalı kesici takımda 0,6 mm aşınma gerçekleşmiştir.

El-Gallab ve Sklad (87), Al/SiC MMK malzemelerin kaplanmış sementit karbür, Al₂O₃/TiC ve PCD takımlar kullanarak farklı kesme parametreleriyle işlenebilirliğini incelemişlerdir. Sementit karbür takımlarda TiN kaplamanın SiC parçacıkların abrasif etkisine karşı koruma sağladığı görülmüştür. PCD kesici takımın Al₂O₃/TiC ve TiN kaplı sementit karbür kesici takımlara göre süper performansı, bu kesicilerin yüksek aşınma direnci ve düşük kesme sıcaklığına yol açan yüksek ısıl iletkenliği ile

açıklanmıştır. PCD takımlarda talaş açısı ve burun radyusunun etkisi de incelenmiştir. 0° talaş açılı takımlar pozitif ve negatif talaş açılı takımlara göre üstün performans göstermişlerdir. Takım uç radyüsü 1.6 mm'den 0.8 mm'ye düşürüldüğünde takımın aşırı kırılma ve krater aşınmasına maruz kaldığı rapor edilmiştir. Ayrıca bu çalışmada da artan ilerleme hızıyla takım aşınmasının azaltılabileceği belirtilmiştir.

El-Gallab ve Sklad (92) diğer bir çalışmalarında Al/SiC MMK malzemenin işlenmesi için bir takım aşınma modeli geliştirmişlerdir. Bu geliştirilen modelle optimum takım geometrisinin ve kesme parametrelerinin seçilmesi amaçlanmıştır. Takım-talaş ve takım-iş parçası arayüzelerindeki ısı ve mekanik etkileşimler dikkate alınmıştır. Sıcaklığa bağlı malzeme özellikleri modele katılmıştır. Takım geometrisinin ve malzemesinin takım üzerinde oluşan gerilmeler ve sıcaklık üzerindeki etkisi sonlu elemanlar modeli kullanılarak gösterilmiştir. Model yardımıyla tahmin edilen sıcaklıklar ve gerilimler daha önce deneysel olarak yapılan ölçümlerle ve takım aşınması gözlemleriyle karşılaştırılmıştır ve iyi bir uyum içinde olduğu belirtilmiştir.

Davim and Baptista (64), %20 SiC parçacık takviyeli A356 alaşımı MMK malzemelerin PCD kesici takımlarla işlenmesinde kesme kuvvetlerini ölçmüşler ve takım aşınma mekanizmalarını incelemişlerdir. Artan ilerleme miktarıyla takım aşınması azaldığı fakat kesme hızının artmasıyla takım yan kenar aşınma hızının aşırı arttığı görülmüştür. 250 m/min kesme hızında, 45 dakikada sadece 0.24 mm yan kenar aşınması oluşurken 700 m/min kesme hızında 2 dakikada 0.42 mm yan kenar aşınması oluşmuştur. Artan yan kenar aşınmasıyla kesme kuvvetlerinin düzenli olarak arttığı gözlemlenmiştir. Takım aşınmasının etkin olarak, yan yüzeyde olduğu ve aşınma mekanizmasının esas olarak abrasif aşınma olmakla birlikte kısmen de adhesiv aşınmanın görüldüğü belirtilmiştir.

3.11. Literatür Özeti

Parçacık takviyeli MMK malzemeler, geleneksel metal ve alaşımlarına göre üstün özellikleri imalatçıların ilgisini çekmekle birlikte bu malzemelerin işlenebilirliklerinin zor olması yaygın olarak kullanılmalarını engellemektedir. Çeşitli yöntemlerle üretilmiş MMK malzemelerin istenilen boyut ve yüzey kalitesinde olmaları için çoğunlukla talaşlı imalat işlemlerine maruz kalmaları gerekmektedir. Matris alaşımlarına katılan dayanımı ve elastikiyet modülü yüksek ve oldukça sert olan takviye elemanları üretilen malzemelerin özelliklerini önemli derecelerde iyileştirirken işlenebilirliklerini ise olumsuz yönde etkilemektedirler. SiC ve Al₂O₃ gibi parçacıkların oldukça aşındırıcı olması sürpriz değildir çünkü talaşlı imalatta kullanılan kesici takımların bir kısmından, özellikle yaygın olarak kullanılan sementit karbür kesici takımlardan, daha serttirler.

Parçacık takviyeli MMK malzemelerin işlenebilirliği üzerine yapılan çalışmalardan bu malzemeleri işlerken yalnızca çok kristalli elmas (PCD) kesici takımların endüstriyel olarak kabul edilebilir bir takım ömrü sağladığı ve çeşitli seramik kesici takımların oldukça yüksek oranlarda takım aşınmasına maruz kaldıkları görülmektedir. PCD kesici takımlarla bu malzemelerin işlenmesinde uygun kesme parametrelerinin, takım aşınmasının ve takım aşınma mekanizmalarının belirlenmesine yönelik çalışma sayısı nispeten fazladır. PCD takımların çok pahalı olması ve kaba işlemler için de uygun olmaması daha ucuz alternatif takımlara olan ihtiyacı gündeme getirmektedir. Sementit karbür kesici takımların ise yalnızca düşük kesme hızları ve yüksek ilerleme miktarlarında, kısmen kullanılabileceği görülmektedir.

Yapılan çalışmalar genellikle tek tip MMK malzeme üzerine yoğunlaşmıştır ve takviye elemanı boyutu ve içeriğinin bu malzemelerin işlenebilirlikleri üzerindeki etkisini inceleyen sistematik olarak yapılmış çalışma sayısı oldukça azdır. PCD kesici takımların bu malzemelerin işlenmesinde en iyi kesici takım olduğu bilinen bir gerçek olmakla birlikte PCD kesici takımların maliyetinin sementit karbür kesici takımlara göre oldukça yüksek olması ve kaba işleme için uygun olmaması ve

maliyeti sementit karbürlerle yaklaşık olarak aynı olan seramik kesici takımların düşük kırılma toklukları nedeniyle hızlı takım aşınmasına maruz kalmaları sementit karbür kesici takımları bu malzemelerin kaba işlenmesinde zorunlu hale getirmektedir. Kübik bor nitrit (CBN) kesici takımlar ise oldukça yüksek sertliklerine rağmen parçacık takviyeli MMK malzemelerin işlenmesinde nadiren kullanılmıştır ve yapılan bu çalışmalardan sementit karbür kesici takımlara göre oldukça iyi performans sergiledikleri görülmüştür. CBN ile yapılan çalışma sayısı oldukça az olduğu için MMK malzemelerin CBN ile işlenmesinde aşınma davranışlarının, aşınma mekanizmalarının, uygun kesme parametrelerinin ve malzeme mikroyapısının (takviye elamanı parçacık büyüklüğü ve oranı) işlenebilirliğe etkilerinin incelenmesine yönelik çalışmalara ihtiyaç vardır.

CVD elmas kaplamalı sementit karbür kesici takımlarla MMK malzemelerin işlenmesiyle ilgili yapılan sınırlı sayıdaki çalışmalarda çelişkiler mevcuttur. Bu nedenle, bu kesici takımların parçacık takviyeli MMK malzemelerin işlenmesinde alternatif bir kesici takım olarak kullanılıp kullanılamayacağını belirlemek için PCD ve sementit karbür kesici takımlarla performanslarının karşılaştırılması için de çalışmalara ihtiyaç vardır.

Bu çalışmada, SiC parçacık boyutu ve oranına göre Al-2014 alaşımı matrisli dokuz farklı MMK malzeme sıvı metal karıştırma-basınçlı döküm metoduyla üretilmiştir. Bu malzemelerin çeşitli özellikleri belirlenip kaplamasız ve kaplamalı sementit karbür, CBN ve CVD elmas kaplamalı sementit karbür kesici takımlarla işlenebilirlik deneyleri yapılmıştır. Kesme hızı, MMK malzeme içerisindeki SiC parçacık boyutu ve oranının bu kesici takımların aşınma davranışları üzerindeki etkileri belirlenmeye çalışılmıştır. Ayrıca, farklı boyut ve oranlarda SiC parçacık takviyeli MMK malzemelerin işlenmesinde kullanılan kesici takımların aşınma dirençleri incelenmiştir.

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

4.1. MMK Malzeme Üretiminde Kullanılan Matris Malzemesi ve Takviye Elemanı

Bu çalışmada sıvı metal karıştırma – basınçlı döküm metodu ile parçacık takviyeli MMK malzeme üretmek için matris malzemesi olarak 2014-Al alaşımı seçilmiştir. 130 mm çapında silindirik alüminyum başlangıç malzemesi olarak kullanılmıştır. Kullanılan 2014-Al alaşımının kimyasal bileşimi Çizelge 4.1’de verilmektedir. Takviye elemanı olarak ise ortalama 30, 45 ve 110 μm boyutlarında silisyum karbür (SiC) parçacıklar kullanılmıştır.

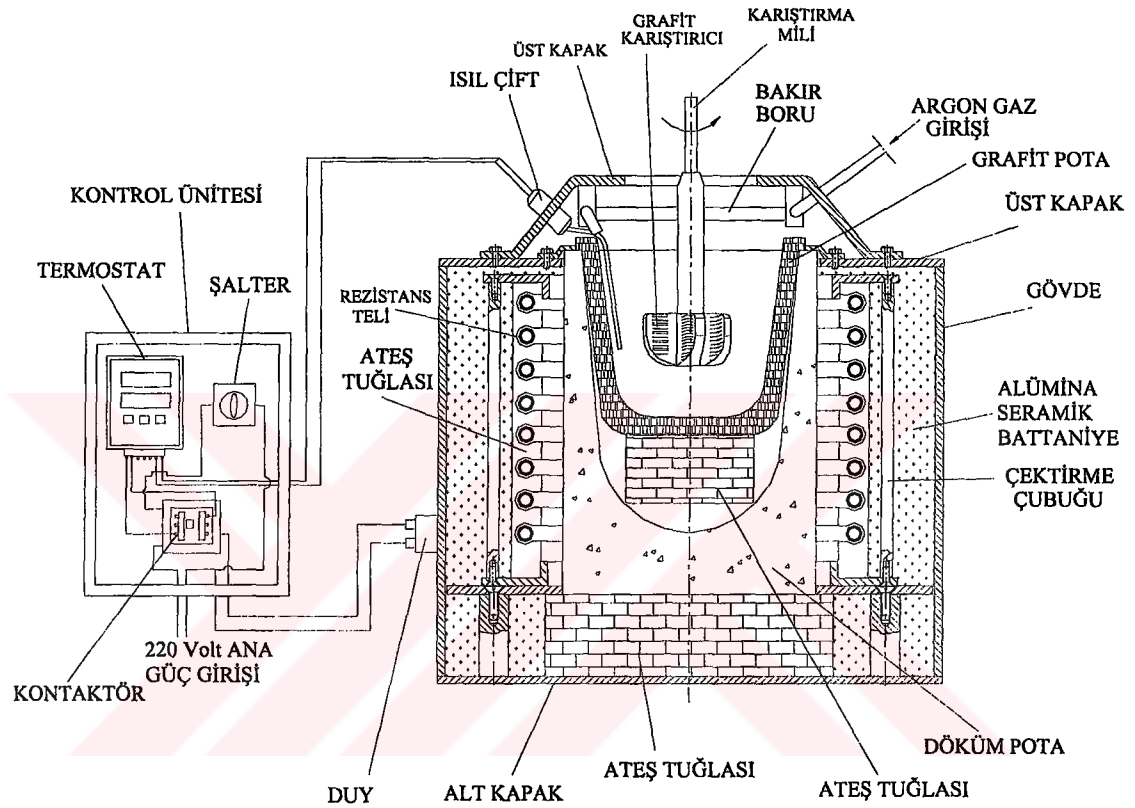
Çizelge 4.1. 2014-Al alaşımının kimyasal bileşimi

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ni	Cr	Pb	Sn	Ti	Sb	Al
%	0,66	0,504	4,49	0,62	0,6	0,11	0,01	0,03	0,03	0,005	0,025	0,04	92,9

4.2. Parçacık Takviyeli MMK Üretimi için Tasarlanan ve İmal Edilen Fırın Ünitesi

Bu çalışmada kullanılacak malzemelerin üretimi için, bu çalışmaya paralel yapılan (13) bir çalışmayla birlikte bir fırın tasarlanıp imal edilmiştir. Bu çalışmada, önceki çalışmadan (13) farklı olarak ergitme ve karıştırma işlemleri grafit potada yapılmıştır. Üretilen fırın sıvı metal karıştırma (döküm) yöntemiyle MMK malzeme üretecek şekilde imal edilmiştir. Sıcaklık ölçümleri için K-tipi bir ısı çifti Şekil 4.1’de görüldüğü gibi pota içersine yerleştirilmiş ve TETCİS firmasından alınan bir elektronik sıcaklık ve güç kontrol ünitesi fırına monte edilmiştir. Ergitme ve karıştırma esnasında ergimiş metalin hava ile temasını engellemek için ergimiş metalin üzerine asal bir gaz verilecek şekilde düzenlemeler yapılmıştır. Ergitme işlemi grafit pota içerisinde, karıştırma işlemi de kristalleşen silika ve 500 elek SiC_p karışımı ile kaplanmış ve özel olarak yapılmış grafit bir karıştırıcı ile yapılacak şekilde fırın imal edilmiştir. Karıştırma işlemi için fırının üst tarafına bir matkap

yerleştirilmiştir. Sıvı metal karıştırma yöntemiyle parçacık takviyeli MMK malzeme üretmek için tasarlanan ve imal edilen fırın, sıcaklık ve güç kontrol ünitesi ile birlikte Şekil 4.1’de şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 4.1. MMK malzeme üretim ünitesinin şematik olarak gösterilmesi

4.3. Parçacık Takviyeli MMK Malzemelerin Üretimi

Matris malzemesi olarak silindirik 2014-Al alaşımı, takviye elemanı olarak da 30, 45 ve 110 μm boyutlarında yeşil silisyum karbür parçacıklar kullanılmıştır. Her bir boyuttaki takviye elemanı parçacıklardan ağırlıkça % 8, % 16 ve % 32 oranında kullanarak dokuz farklı kompozit malzeme üretimi gerçekleştirilmiştir. Üretilen kompozit malzemeler ve takviye elemanı boyutları ve oranları Çizelge 4.2’de gösterilmektedir.

Çizelge 4.2. Üretilen MMK malzemeler

	SiC _p parçacık boyutu (μm)	Ağırlıkça SiC _p oranı
Al-%8 SiC/30	30	8
Al-%16 SiC/30	30	16
Al-%32 SiC/30	30	32
Al-%8 SiC/45	45	8
Al-%16 SiC/45	45	16
Al-%32 SiC/45	45	32
Al-%8 SiC/110	110	8
Al-%16 SiC/110	110	16
Al-%32 SiC/110	110	32

Belirli ağırlıkta matris malzemesi grafit pota içerisine yerleştirildikten sonra fırın sıcaklığı 725°C'a çıkartılıp malzeme tamamen ergiyene kadar bekletilmiştir. Kristalleşen silika ve 500 elek SiC parçacıkların karışımı bir koruyucu ile kaplanmış grafit bir karıştırıcı ergimiş metal alaşımı içerisine daldırılarak döndürülmeye başlatılmış ve ergimiş metal içerisinde vortex oluşturulmuştur. Daha sonra fırın sıcaklığı 675°C'a düşürülmüştür. Fırın sıcaklığı 675°C'a düştüğünde 1000°C sıcaklıkta 2 saat bir ısıtma işlemi fırını içerisinde bekletilerek yüzeyleri oksitlenmiş SiC parçacıklar yaklaşık olarak 3 g/min hızda ergimiş metale ilave edilmiştir. Parçacıkların ilave edilmeye başlanmasıyla ağırlıkça % 0.5 oranında Mg ıslanabilirliği iyileştirmek amacıyla ergimiş metale ilave edilmiştir. Bütün ergitme ve ilave işlemleri argon gazı atmosferinde yapılmıştır. Parçacıkların ilave işlemi bittikten sonra 5 dakika daha karıştırma işlemine devam edilmiştir. Karıştırma işlemi tamamlandığında ergimiş metal yaklaşık 300 °C sıcaklığındaki çelik kalıp içerisine dökülerek katılaşma gerçekleşene kadar bir hidrolik pres vasıtasıyla 40 MPa basınç uygulanmıştır. Bu şekilde 30 mm çapında ve yaklaşık 120 mm boyunda silindirik malzemeler üretilmiştir.

4.4. Metalografik İncelemeler

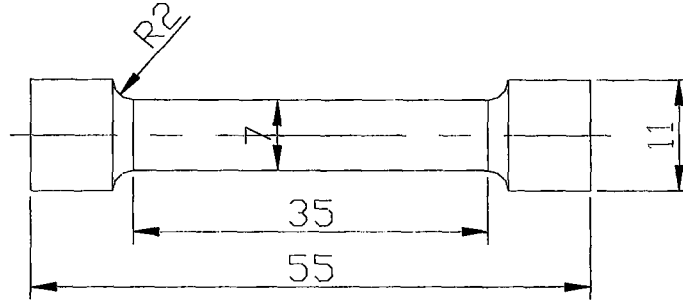
Üretilen bütün numunelerden küçük örnekler alınarak bakalit içerisine sıcak presleme metoduyla gömülmüştür. Bu numuneler sırasıyla 240, 400, 600, 800 ve 1200 numaralı SiC zımpara kağıtlarıyla zımparalanıp daha sonra parçacık dağılımı yeterli netlikte görülene kadar 1 μ m'lik elmas pasta içeren keçede parlatılmıştır. Parlatma işlemlerini müteakiben optik mikroskopta çeşitli büyütmelemlerde mikroyapı fotoğrafları çekilmiştir.

4.5. Sertlik Ölçümleri

Matris malzemesinin ve üretilen MMK malzemelerin sertlikleri, Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Metal Eğitimi Bölümü Malzeme Laboratuvarında bulunan INSTRON WOLPERT GmbH DIATESTOR 7551 tipi sertlik ölçüm ünitesi kullanılarak Brinell sertlik ölçeğinde ölçülmüştür. Ölçümler 2,5 mm çapında bilye kullanılarak 187,5 kg yük altında gerçekleştirilmiştir.

4.6. Çekme Deneyi

Üretilen MMK malzemelerden hazırlanan çekme deney numuneleri, Orta Doğu Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Malzeme ve Metalurji Mühendisliği Laboratuvarında bulunan bir çekme deney cihazında çekme deneyine tabi tutulmuştur. Bu çekme cihazının tasarımı ve üretimi Orta Doğu Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Malzeme ve Metalurji Mühendisliği bölümünün imkanlarıyla yapılmıştır. Şekil 4.2'de deney numunesinin boyutları gösterilmektedir.



Şekil 4.2. Çekme deney numunesi

4.7. İşlenebilirlik Deneyleri

4.7.1. Kesici takımlar ve takım tutucular

İşlenebilirlik deneyleri için dört farklı kesici takım kullanılmıştır. Bunlar; kaplamasız sementit karbür (SPMN 120308), kaplamalı sementit karbür (SPMN 120308), kübik bor nitrit (CBN) (CCGW 09T308G2) ve CVD elmas kaplamalı sementit karbürdür (TNMG 160408 FN-ALP-N DIA, talaş kırıcılı). Çizelge 4.3 bu takımlara ait bilgiler verilmiştir. Kaplamasız ve kaplamalı sementit karbür kesici takımlar ISO kodlamasına göre K10 kalitesindedir. Kaplamalı ve kaplamasız sementit karbür kesici takımlar SSBCR-2020-K12 kodlu bir takım tutucuya, CBN kesici takımlar SCGCR-1616-H09 kodlu bir takım tutucuya ve CVD elmas kaplamalı kesici takımlar da CTANR-2525-M16 kodlu bir takım tutucuya bağlanmıştır.

Çizelge 4.3. Kesici takımların kodları, kaplamaları ve üretici firmaları

Kesici takım	Üretici firma kodu	Kaplama	Üretici firma
Kaplamasız sementit karbür	Hti10	-	Mitsubishi
Kaplamalı sementit karbür	UC 5005	TiN, Al ₂ O ₃ ve TiCN	Mitsubishi
Kübik bor nitrit	-	-	Mitsubishi
CVD elmas kaplamalı sementit karbür	-	Elmas	Stellram

4.7.2. Takım tezgahları

İşlenebilirlik deneyleri için iki farklı takım tezgahı kullanılmıştır. Kaplamalı sementit karbür, kaplamasız sementit karbür ve kübik bor nitrit (CBN) kesici takımlarla yapılan deneylerde DYNA CNC torna tezgahı kullanılmıştır. DYNA CNC tezgahı 8 kW gücünde ve sürekli değişken iş mili hızı 2500 rev/min'e kadar yükselbilmektedir. CVD elmas kaplamalı sementit karbür kesici takımlarla yapılan deneyler de ise kesme kuvvetleri de ölçüldüğü için endüstriyel tip Johnford TC35 tipi CNC torna tezgahı kullanılmıştır. Johnford TC35 CNC tezgahı da 10 kW gücünde ve sürekli değişken iş mili hızı 4000 rev/min'e kadar yükselbilmektedir. Kesme kuvvetlerinin üç bileşenini aynı anda ölçebilen bir dinamometre Johnford TC35 tipi CNC torna tezgahına bağlanmıştır. Kuvvet ölçmelerini gerçekleştirebilmek için kullanılan dinamometre Kistler 9257 B model ve kullanılan Charge Amplifier da 5019 B130'dur.

4.7.3. Deneyler

Kesme işlemleri bütün kesici takımlarda soğutma sıvısı kullanılmadan 0,12 mm/rev ilerleme hızı ve 1 mm talaş derinliğinde yapılmıştır. Kaplamalı ve kaplamasız sementit karbür kesici takımlarla deneyler 20, 40, 60 ve 80 m/min kesme hızlarında

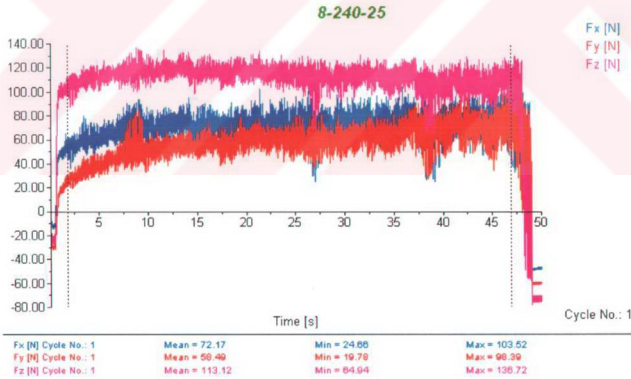
yapılmıştır. Kesici takım aşınması, sabit talaş derinliği, sabit ilerleme hızı ve farklı kesme hızlarında 625 veya 1250 mm³ talaş kaldırılması sonucu ölçülmüştür. % 8 oranında 110 µm SiCp içeren MMK malzemenin her iki kesici takımla da bütün kesme hızlarında işlenmesi sonucu çok yüksek miktarda yan yüzey aşınması gerçekleştiği için % 16 ve 32 oranında bu boyuttaki parçacıklar içeren MMK malzemeler üzerinde deney yapılmamıştır.

CBN kesici takımın maliyetinin sementit karbür kesici takımlara göre oldukça yüksek olması nedeniyle deneyler yalnızca üç farklı büyüklükte % 16 oranında parçacıklar içeren MMK malzemeler üzerinde yapılmıştır. Bu kesici takımlarla deneyler 50, 100, 150 ve 200 m/min kesme hızlarında yapılmıştır. Başlangıçta 100 m/min kesme hızı her üç malzeme üzerinde de denenmiştir. 110 µm SiCp içeren MMK malzemenin işlenmesi sonucu aşırı takım aşınması meydana geldiğinden dolayı bu malzemenin işlenmesi için daha düşük bir kesme hızı, 50 m/min denenmiştir. 30 ve 45 µm parçacıklar içeren diğer iki malzemenin işlenmesin ise aşınma oldukça düşük olduğu için 150 ve 200 m/min kesme hızlarında da deneyler yapılmıştır. Bütün deneylerde kesici takım aşınmaları 2500 mm³ talaş kaldırılması sonucu ölçülmüştür.

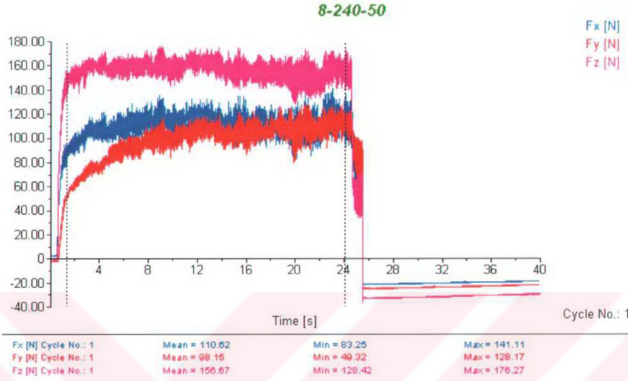
CVD elmas kaplamalı sementit karbür kesici takımlarla deneyler 25, 50, 75, 100 ve 125 m/min kesme hızlarında yapılmıştır. Talaş derinliği 1 mm ve ilerleme hızı da 0,12 mm/rev olarak bütün deneylerde sabit tutulmuştur. CVD elmas kaplamalı sementit karbür kesici takımın bu çalışmada kullanılan kaplamasız ve kaplamalı sementit karbür kesici takımlardan daha iyi aşınma direncine sahip olduğu beklendiği için CBN kesici takımlarda olduğu gibi yan yüzey aşınmaları 2500 mm³ talaş kaldırıldıktan sonra ölçülmüştür. 110 µm boyutlu parçacıkla takviyeli MMK malzemelerin işlenmesi sonucunda kaplamasız ve kaplamalı sementit karbür ve CBN kesici takımlarda çok yüksek yan yüzey aşınması gerçekleştiği için CVD elmas kaplamalı sementit karbür kesici takımlarla deneyler 30 ve 45 µm parçacıklar içeren MMK malzemeler üzerinde yapılmıştır.

Yapılan çalışmalarda elmas kaplamalı sementit karbür kesici takımlar için yüksek kesme hızları kullanılması nedeniyle başlangıçta deneylerin 50, 75, 100 ve 125 m/min kesme hızlarında yapılması planlanmıştır. Deneyler sonucunda elmas kaplamalı sementit karbür kesici takımların tahmin edildiği gibi aşınma dirençlerinin iyi olmadığı görülmüştür ve artan kesme hızıyla yan yüzey aşınmasının artması nedeniyle hız düşürülmüş ve 25 m/min'de de deneyler yapılmıştır.

Kesme kuvvetleri yapılan her bir deneyde talaş kaldırma süresince ölçülmüştür. Sonuçların grafik olarak elde edilmesi için Dynaware programı kullanılmıştır. Elde edilen kesme kuvvetleri grafiklerinden iki örnek Şekil 4.3 ve Şekil 4.4'te gösterilmektedir. Şekillerden görüldüğü gibi kesme kuvvetlerinin her üç bileşeni ve kuvvet değerlerinin en büyük, en düşük ve ortalama değerleri grafiklerin altında verilmektedir. Esas kesme kuvveti bu grafiklerde Fz ile gösterilmektedir.



Şekil 4.3. Al-%8 SiC/45 MMK malzemenin CVD elmas kaplamalı sementit karbür kesici takımla 25 m/min kesme hızında işlenmesi esnasında oluşan kesme kuvvetleri



Şekil 4.4. Al-%8 SiC/45 MMK malzemenin CVD elmas kaplamalı sementit karbür kesici takımla 50 m/min kesme hızında işlenmesi esnasında oluşan kesme kuvvetleri

4.7.4. Takım mikroskobu, yüzey pürüzlülüğü ölçme cihazı ve tarama elektron mikroskobu (SEM)

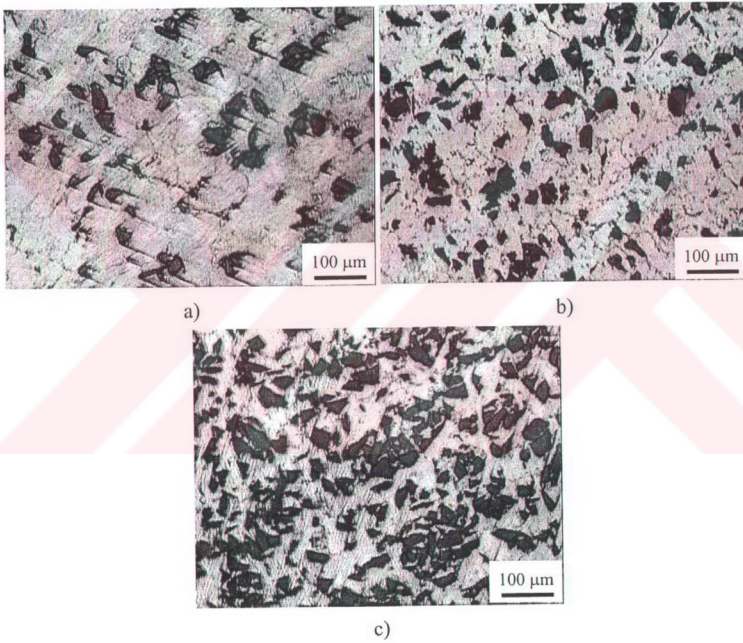
Kesici takım yan yüzey aşınması 0,01 mm hassasiyetli bir takım mikroskobu ile ölçülmüştür. İşlenmiş yüzeyler üzerinde yüzey pürüzlülüğü ölçümleri için Mitutoyo Surftest 211 cihazı kullanılmıştır. Ölçümler için cut-off uzunluğu 0,8 mm ve örnekleme uzunluğu da 5 mm olarak alınmıştır.

Kırılma yüzeylerini ve kesici takımların aşınmalarını daha ayrıntılı olarak incelemek için Kırıkkale Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü Laboratuvarlarında bulunan JOEL JSM-5600 model tarama elektron mikroskobunda SEM çalışmaları yapılmıştır.

5. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

5.1. Mikroyapı Fotoğrafları

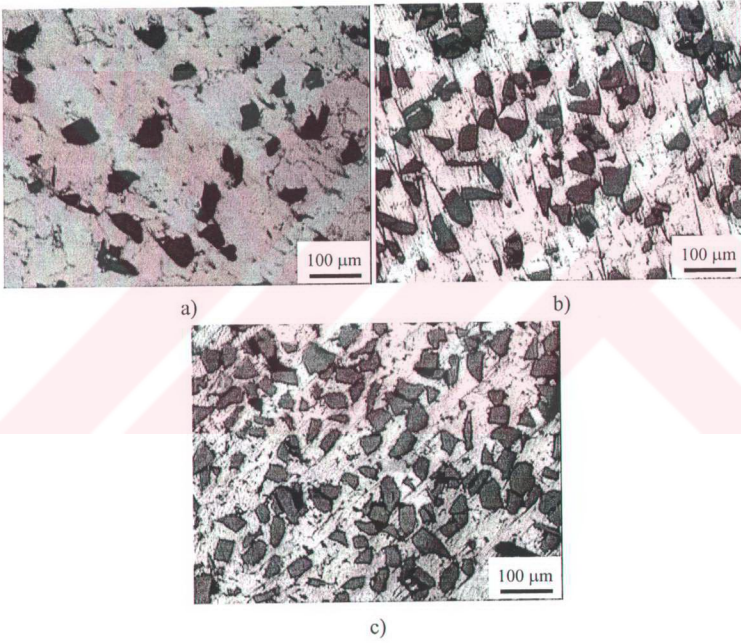
SiC parçacık boyutu ve oranına göre dokuz farklı SiC parçacık takviyeli MMK malzemenin mikroyapı fotoğrafları Şekil 5.1, Şekil 5.2 ve Şekil 5.3’de verilmektedir.



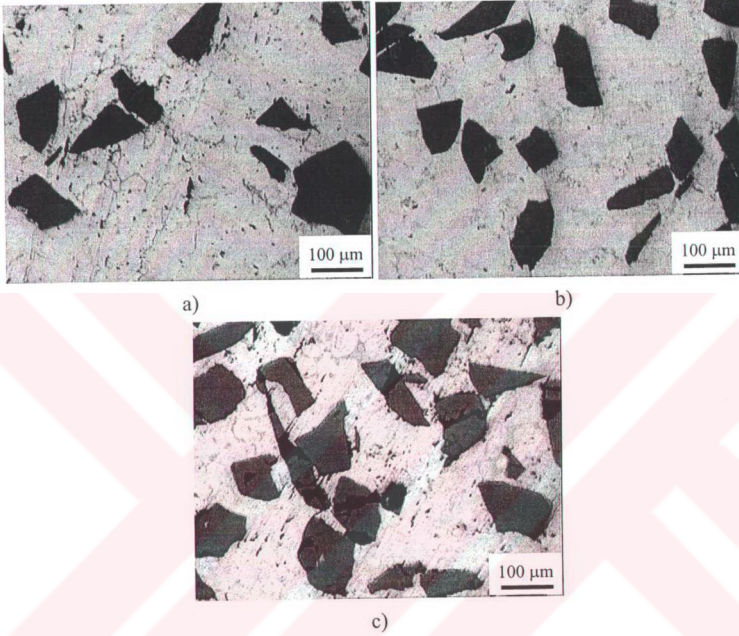
Şekil 5.1. MMK malzemelerin mikroyapı fotoğrafları, a) Al-%8 SiC/30, b) Al-%16 SiC/30 ve c) Al-%32 SiC/30

Şekil 5.1 a), b) ve c)’deki mikroyapı fotoğraflarından genelde homojen bir parçacık dağılımı görülmekle birlikte SiC parçacıkların bazı bölgelerde daha yoğun olarak bir arada bulunduğu görülmektedir. Pratikte sıvı metal karıştırma yöntemi ile MMK malzeme üretmede homojen parçacık dağılımı elde etmenin güç olduğu ve özellikle de parçacık boyutu nispeten küçük olduğu durumlarda parçacıkların topaklanma

eğiliminin daha da arttığı belirtilmiştir (93). MMK malzemenin katılaşması esnasında katı takviye parçacıklarının büyüyen dendritlerden katı-sıvı arayüzüne doğru itilmesi topaklanmanın nedeni olarak açıklanmıştır (93). Şekil 5.1'de bu çalışmada kullanılan en küçük boyutlu ($30\ \mu\text{m}$) SiC parçacıklarla takviyeli MMK malzemelere ait mikroyapı fotoğrafları görülmektedir. Yapıda zaman zaman parçacıkların topaklandığı dikkat çekmektedir.



Şekil 5.2. MMK malzemelerin mikroyapı fotoğrafları, a) Al-%8 SiC/45, b) Al-%16 SiC/45 ve c) Al-%32 SiC/45

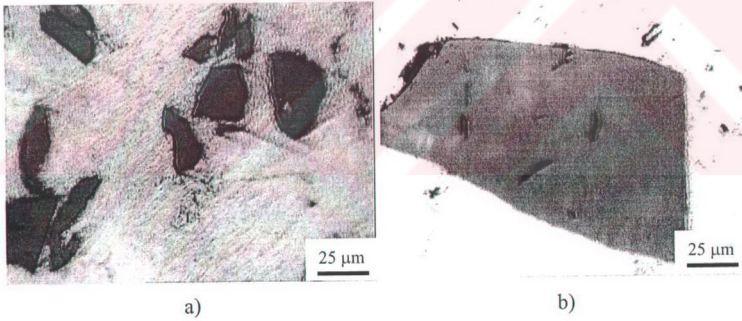


Şekil 5.3. MMK malzemelerin mikroyapı fotoğrafları, a) Al-%8 SiC/110, b) Al-%16 SiC/110 ve c) Al-%32 SiC/110

Şekil 5.1'deki mikroyapı fotoğrafları ile Şekil 5.2 ve Şekil 5.3'deki mikroyapı fotoğrafları karşılaştırıldığında parçacık boyutu arttıkça topaklanma eğiliminin daha az olduğu görülmektedir. SiC parçacıkların boyutunun 30 μm olması durumunda topaklanma fazla olurken boyutun 45 μm ve 110 μm olması durumunda topaklanmanın daha az olduğu yukarıdaki şekillerden görülmektedir. Bununla birlikte, parçacık boyutunun artmasıyla matriste bir kısım boşluklar, özellikle yüksek oranlarda SiC ihtiva eden MMK malzemelerin mikroyapılarında görülmektedir (siyah bölgeler), (Şekil 5.2 c) ve Şekil 5.3 c)). Bunların genelde iki veya daha fazla parçacığın arasında olduğu dikkat çekmektedir. Bunun sebebi birkaç şekilde açıklanabilir. Bunlar; 1) sıvı matrisin arayüzeylere tam olarak nüfuz edemediğinden

dolayı olabilir, 2) iri parçacıkların kırılması neticesinde bu boşluklar orada kalmış olabilir (Şekil 5.3) ve 3) kırılan parçacığın üzerindeki matris metalografik hazırlama sırasında yapıdan uzaklaşmış olabilir.

Al matris ve takviye elemanı arasındaki birleşmeyi daha iyi görebilmek için daha büyük büyütmelerde fotoğraflar çekilmiştir ve bunlar Şekil 5.4 a) ve b)'de gösterilmektedir. Bu fotoğraflardan Al-%8 SiC/110 MMK malzemede matris ile SiC parçacıkların ara yüzeylerinde daha iyi bir birleşme olduğu görülmektedir. Al-%8 SiC/30 MMK malzemede SiC parçacık ile matris arasındaki birleşmenin nispeten zayıf olması parçacık boyutunun küçük olması ile açıklanabilir. SiC parçacık matrise ilave edilirken parçacık boyutu küçüldükçe daha fazla birim yüzey alanından dolayı metalin parçacığı çevrelemesi için daha çok deforme olmaya ve dolayısıyla daha fazla yüzey enerjisine ihtiyaç vardır (24).



Şekil 5.4. Matris – takviye elemanı arayüzeyi a) Al-%8 SiC/30 ve b) Al-%8 SiC/110

5.2. Sertlik

Dokuz farklı MMK malzeme için Brinell sertlik değerleri toplu olarak Çizelge 5.1'de verilmektedir. Çizelge 5.1'den de görüldüğü gibi, artan parçacık ağırlık oranı ve küçülen parçacık boyutu ile sertlik değerleri artmaktadır. Bununla birlikte, bir istisna olarak Al-%8 SiC/45 MMK malzemenin sertliği Al-%8 SiC/110 MMK malzemenin sertliğinden daha az bulunmuştur. Bu durum, Al-%8 SiC/45 MMK malzemedeki

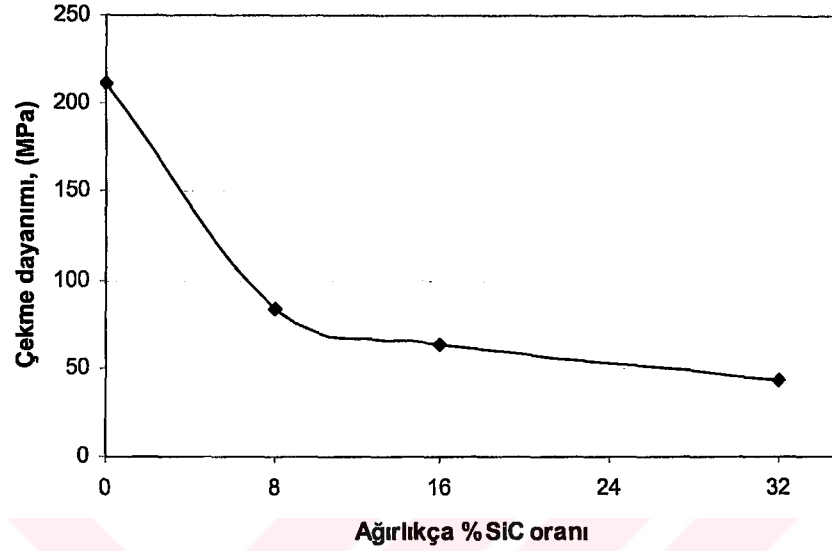
muhtemel boşluklara veya ölçüm yapılan yerlerdeki daha az SiC parçacık yoğunluğuna atfedilebilir. Artan parçacık oranı ve küçülen parçacık boyutu ile parçacık takviyeli MMK malzemelerin sertliklerinin arttığı daha önce yapılan bir çalışmada görülmüştür (93).

Çizelge 5.1. Brinell sertlik değerleri

MMK Malzeme	Sertlik değeri (BSD)
Al-2014	75
Al-%8 SiC/30	125,3
Al-%16 SiC/30	132
Al-%32 SiC/30	154,6
Al-%8 SiC/45	110,33
Al-%16 SiC/45	127,33
Al-%32 SiC/45	140,66
Al-%8 SiC/110	121
Al-%16 SiC/110	126
Al-%32 SiC/110	135

5.3. Çekme Dayanımları

30 ve 45 μm SiC parçacıklardan ağırlıkça % 8, 16 ve 32 oranında içeren MMK malzemeler ve takviye elemanı içermeyen matris malzemesi çekme deneylerine tabi tutulmuştur. Al-%8 SiC/45 ve Al-%32 SiC/45 MMK malzemeler yapılarındaki hatalar nedeniyle ön kuvvet uygulaması esnasında kopmuştur. Matris malzemesi ve diğer MMK malzemeler için çekme dayanımı sonuçları (UTS) Şekil 5.5’de verilmektedir. Matris malzemesi ile karşılaştırıldığında MMK malzemelerin çekme dayanımlarında azalma olduğu görülmektedir.



Şekil 5.5. Matris ve 30 μm SiC parçacıklar içeren MMK malzemelerin çekme dayanımları (UTS)

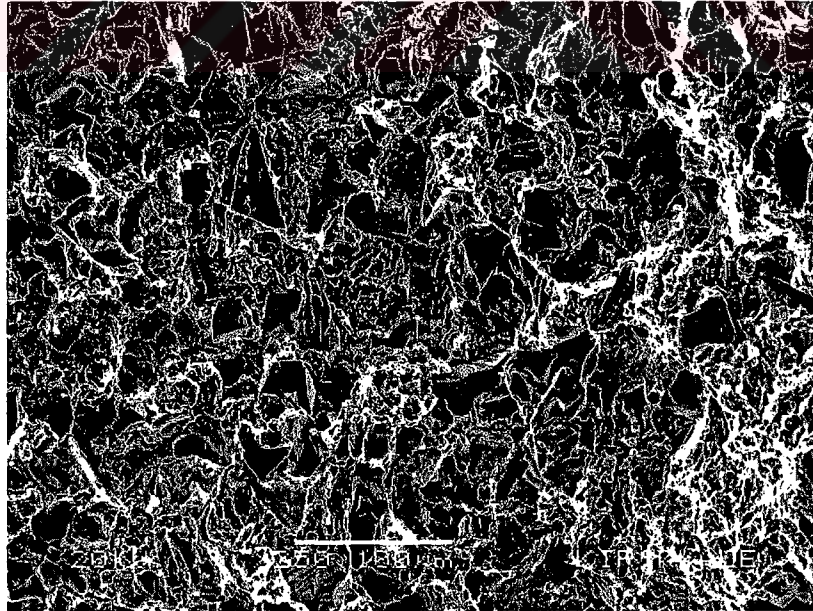
Sıvı metal karıştırma yöntemiyle üretilmiş MMK malzemelerin çekme dayanımlarında (UTS) takviye elemanı içermeyen matris malzemesine göre azalmalar olduğu daha önce yapılan çalışmalarda da görülmüştür (20,54). Surappa ve Rohatgi (54) ağırlıkça % 11,8 Si içeren Al alaşımına sıvı metal karıştırma yöntemiyle ağırlıkça % 1 – 4,5 arasında Al_2O_3 parçacıklar ilave ederek ürettikleri MMK malzemelerin, takviyesiz matris alaşımına göre çekme dayanımlarının düştüğünü ve artan parçacık oranı ile çekme dayanımının daha da azaldığını gözlemlemişlerdir. Örneğin, takviyesiz matris alaşımının çekme dayanımı 156,89 MPa olarak bulunurken % 4,5 parçacık ilave edilerek üretilen MMK malzemenin çekme dayanımı 118,65 MPa'la düşmüştür. Benzer şekilde Abdel-Azim et al.'da (20) Al-2024/ Al_2O_3 MMK malzemelerin çekme dayanımlarının takviyesiz matris alaşımına göre azaldığını ve ayrıca artan Al_2O_3 oranı ile bu azalmanın daha da arttığını belirtmişlerdir.

Çekme deneyine tabi tutulan numunelerin kırılma yüzeylerinde bir miktar hataların olduğu makro inceleme ile dahi görülebilmektedir. SiC parçacıklar ile matris malzemesi arasında iyi bir bağın olup olmadığı ve kırılma biçiminin belirlenmesi için kırılma

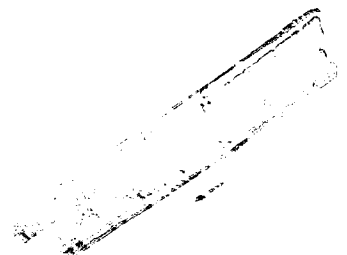
yüzeyleri SEM ile incelenmiş ve genel kırık yüzey görüntüleri Şekil 5.6 ve Şekil 5.7’de verilmiştir.

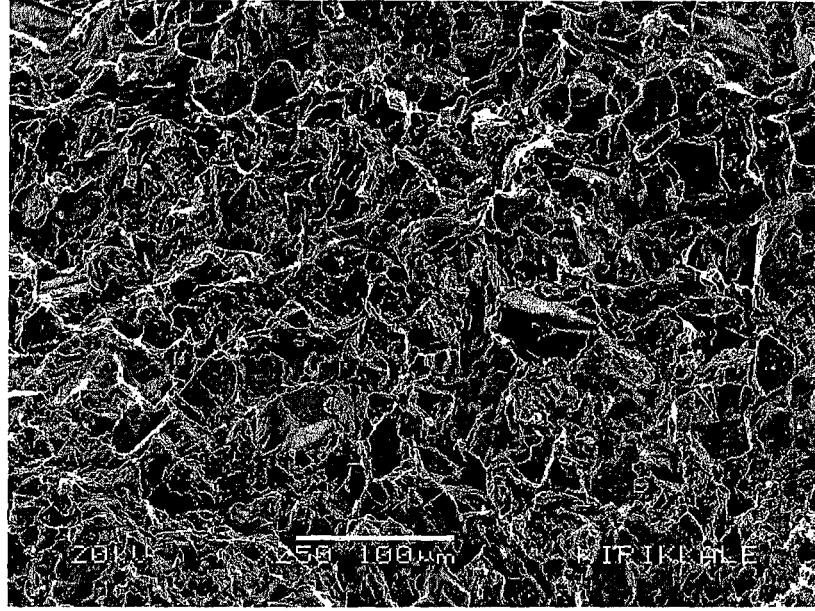
Kırık yüzeylerin incelenmesinden, kırılmanın genelde matris içerisinde sünek kırılma tavrı sergilediği ancak parçacık bulunan bölgelerde parçacık/matris arayüzeyinde ayrışmalar şeklinde olduğu görülmektedir. Yapı içerisinde parçacıkların kopması ile ortaya çıkan parçacık şekline benzeyen düzgün kenarlı boşluklar da bu tezi doğrulamaktadır. Bu olay Al-%8 SiC/30 MMK numunede parçacık içeriğinin az olması nedeniyle pek net olarak görülmemesine karşın (Şekil 5.6) daha fazla parçacık ihtiva eden MMK malzemede (Şekil 5.7) daha net olarak görülmektedir.

Ana matrisin özellikle parçacık yoğunluğunun az olduğu bölgelerinde (Şekil 5.6 sağ alt köşe gibi) girinti-çıkıntı oluşturarak kopma oluşması yapının sünek kırılma tavrı sergilediğini göstermektedir. Bununla birlikte zaman zaman bazı bölgelerde parçacık/matris arayüzeyinden olmayıp parçacıkların ikiye bölünmesi şeklinde olması iyi bir arayüzey bağının olduğunu gösterir.



Şekil 5.6. Al-%8 SiC/30 MMK malzemenin kırılma yüzeyi





Şekil 5.7. Al-%32 SiC/30 MMK malzemenin kırılma yüzeyi

5.4. İşlenebilirlik Deneyleri

Bu çalışmada, malzeme içerisindeki SiC parçacıkların boyutu, ağırlıkça yüzde oranları ve kesme hızının farklı kesici takımlar üzerindeki etkileri incelenmiştir. İşlenebilirlik parametrelerinden kesici takım yan yüzey aşınması, yüzey pürüzlülüğü değerlendirilmiş ayrıca elmas kaplamalı sementit karbür kesici takımlarda kesme kuvvetleri de belirlenmiştir. Ölçülen kesici takım yan yüzey aşınmaları sabit miktarda talaşın sabit talaş derinliği ve ilerleme hızında kaldırılması sonucu gerçekleşen aşınma olduğu için gerçek anlamda yan yüzey aşınması olmamakla birlikte kesici takımların bu malzemeleri kesmedeki performanslarını göstermektedir. Normalde, yan yüzey aşınması sabit bir kesme hızında geçen sürenin bir fonksiyonu olarak elde edilir.

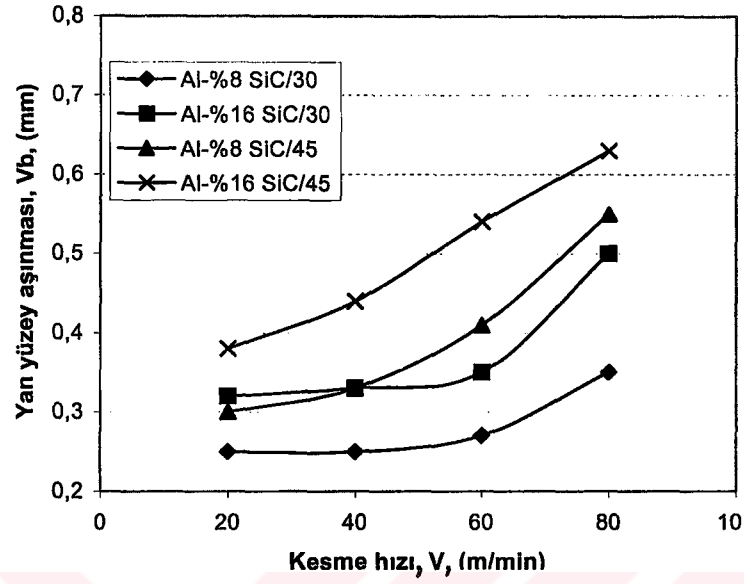
5.4.1. Kaplamasız ve kaplamalı sementit karbür kesici takımlar

5.4.1.1. Kesici takım yan yüzey aşınması

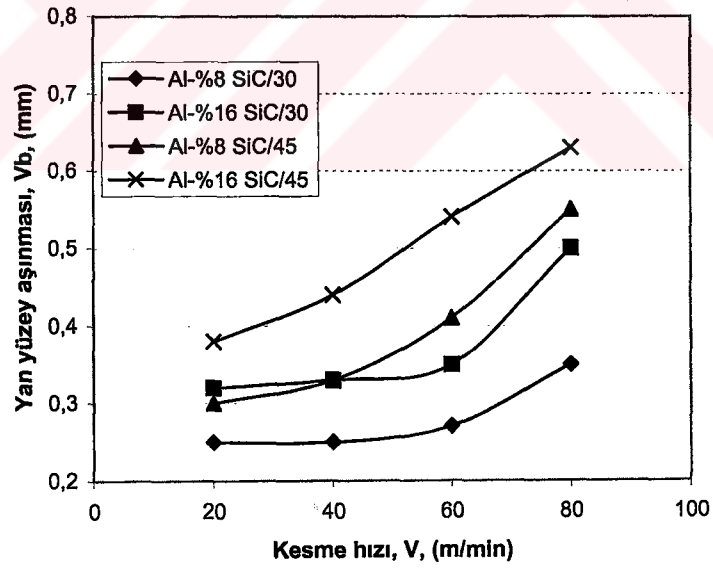
Deneyler kaplamasız ve kaplamalı sementit karbür kesici takımlarla, 1 mm talaş derinliği, 0,12 mm/rev ilerleme oranı ve 20, 40, 60 ve 80 m/min kesme hızlarında

ağırlıkça % 8, 16 ve 32 oranlarında ortalama 30 ve 45 μm boyutlarında ve % 8 oranında ortalama 110 μm boyutunda parçacıklar içeren 7 farklı MMK malzeme üzerinde yapılmıştır. % 8 ve 16 oranında 30 ve 45 μm boyutlu parçacıklar içeren MMK malzemelerde 1250 mm^3 ve diğer MMK malzemelerde de hızlı takım aşınması tahmin edildiği için 625 mm^3 talaş kaldırma işleminden sonra takım aşınmaları ölçülerek 0,5 mm yan yüzey aşınması gerçekleşene kadar deneylere devam edilmiştir. % 8 oranında 110 μm parçacıklar içeren MMK malzemenin bütün kesme hızlarında her iki kesici takımla da işlenmesi sonucu çok yüksek kesici takım yan yüzey aşınması gerçekleştiği için % 16 ve 32 oranlarında aynı boyutlardaki parçacıklar içeren MMK malzemeler üzerinde deneyler yapılmamıştır. Şekil 5.8 ve Şekil 5.9 sabit talaş derinliği ve sabit ilerleme hızında 1250 mm^3 talaş kaldırma işleminden sonra sırasıyla kaplamasız (Hti10) ve kaplamalı (UC5005) kesici takımlardaki yan yüzey aşınmalarını göstermektedir.

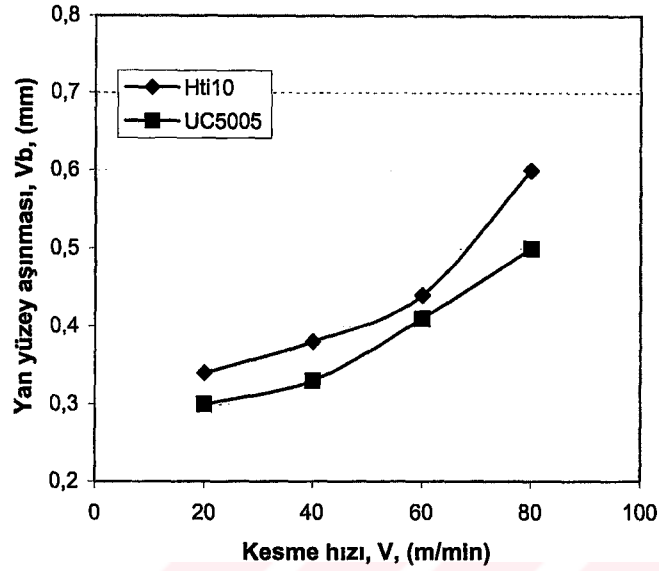
Şekil 5.8 ve Şekil 5.9'dan görüldüğü gibi her iki kesici takımda da artan kesme hızı, parçacık oranı ve parçacık boyutu ile takım aşınması artmıştır. Kaplamalı kesici takımlar çoğunlukla kaplamasız kesici takımlardan daha az yan yüzey aşınmasına maruz kalmışlardır. Örneğin en düşük aşınmanın gerçekleştiği 20 m/min kesme hızında % 8 oranında 45 μm parçacıklar içeren MMK malzemenin işlenmesinde kaplamalı kesici takımda 0,3 mm yan yüzey aşınması oluşurken kaplamasız kesici takımda 0,34 mm yan yüzey aşınması oluşmuştur. Şekil 5.10, % 8 oranında 45 μm boyutlu parçacıklar içeren MMK malzemenin kaplamasız ve kaplamalı kesici takımlarla işlenmesi sonucunda bütün kesme hızları için bu takımlarda oluşan yan yüzey aşınmalarını göstermektedir.



Şekil 5.8. 1250 mm³ talaş kaldırma işleminden sonra kaplamasız sementit karbür kesici takımlarda oluşan yan yüzey aşınmaları



Şekil 5.9. 1250 mm³ talaş kaldırma işleminden sonra kaplamalı sementit karbür kesici takımlarda oluşan yan yüzey aşınmaları

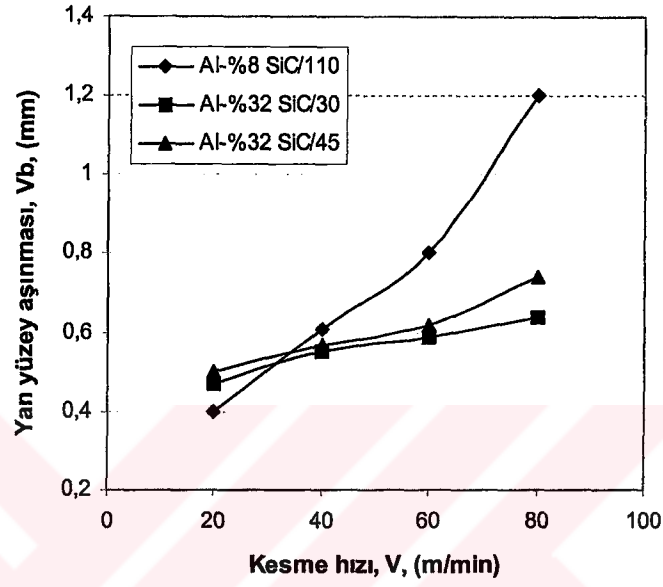


Şekil 5.10. Al-%8 SiC/45 MMK malzemenin kaplamasız ve kaplamalı sementit karbür kesici takımlarla işlenmesi sonucu oluşan yan yüzey aşınmaları

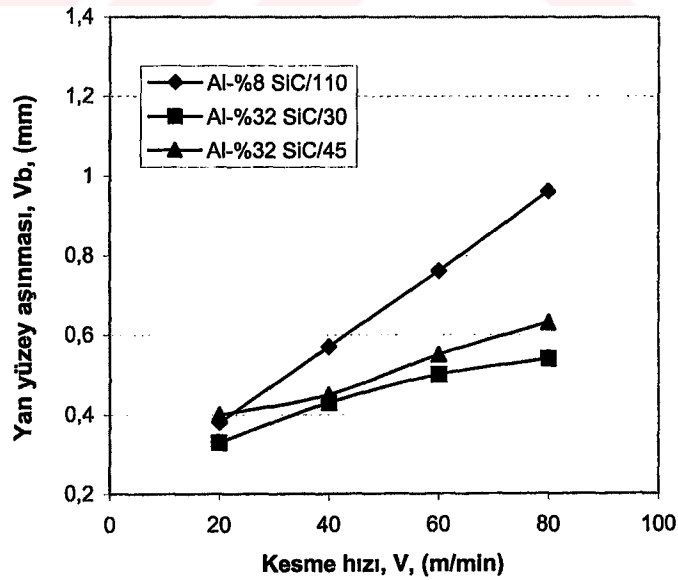
Artan parçacık oranı ve boyutu nedeniyle çok hızlı kesici takım aşınması tahmin edilen MMK malzemeler (Al-%32 SiC/30, Al-%32 SiC/45 ve Al-%8 SiC/110) için deneyler 625 mm³ talaş kaldırıldıktan sonra durdurulup takım aşınması ölçüldüğünden dolayı bu kesici takımlardaki aşınmalar yukarıdaki grafiklerde verilememiştir. Bu üç MMK malzemenin kaplamasız ve kaplamalı kesici takımlarla işlenmesi sonucu gerçekleşen takım aşınmaları Şekil 5.11 ve Şekil 5.12’de görülmektedir.

Şekil 5.11 ve 5.12’den görüldüğü gibi parçacık oranı fazla ve parçacık boyutu büyük olan bu üç MMK malzemenin işlenmesinde 625 mm³ talaş kaldırıldıktan sonra her iki kesici takımda da oluşan yan yüzey aşınmaları diğer MMK malzemelerin işlenmesinde 1250 mm³ talaş kaldırıldıktan sonra oluşan yan yüzey aşınmalarından daha fazladır. Özellikle, Al-%8 SiC/110 MMK malzemenin her iki kesici takımla da işlenmesinde artan kesme hızı ile yan yüzey aşınmasındaki artış da diğer MMK malzemelere göre daha fazla olmuştur. Yukarıda verilen grafiklerde belirli miktarlarda talaş kaldırma işleminden sonra kesici takım yan yüzey aşınmaları verilmiştir. Bununla birlikte, işlenebilirlik deneyleri 0,5 mm kesici takım yan yüzey

aşınması gerçekleşene veya bu değer geçilene kadar devam etmiştir. Çizelge 5.2, deneyler sonucunda kesici takımların kaldırdıkları talaş miktarlarını yan yüzey aşınma değerleri ile birlikte göstermektedir.



Şekil 5.11. 625 mm³ talaş kaldırma işleminden sonra kaplamasız sementit karbür kesici takımlarda oluşan yan yüzey aşınmaları



Şekil 5.12. 625 mm³ talaş kaldırma işleminden sonra kaplamalı sementit kesici takımlarda oluşan yan yüzey aşınmaları

Çizelge 5.2. Kaplamasız ve kaplamalı sementit karbür kesici takımlarda kaldırılan talaş hacmi ve yan yüzey aşınması

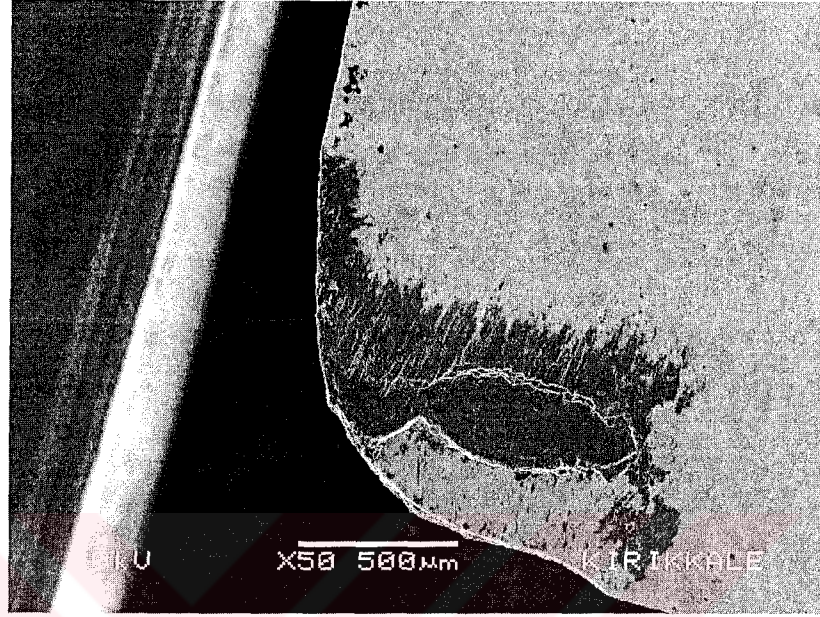
Kesme hızı (m/min)		20		40		60		80	
Kesici takım	İş parçası	Kaldırılan talaş hacmi (mm ³)	Yan yüzey aşınması (mm)	Kaldırılan talaş hacmi (mm ³)	Yan yüzey aşınması (mm)	Kaldırılan talaş hacmi (mm ³)	Yan yüzey aşınması (mm)	Kaldırılan talaş hacmi (mm ³)	Yan yüzey aşınması (mm)
Kaplamasız sementit karbür	Al-%8 SiC/30	5000	0,52	5000	0,53	3750	0,51	2500	0,61
	Al-%16 SiC/30	5000	0,56	3750	0,53	2500	0,50	1250	0,54
	Al-%32 SiC/30	1250	0,51	1250	0,55	625	0,50	625	0,55
	Al-%8 SiC/45	3750	0,54	2500	0,51	2500	0,58	1250	0,63
	Al-%16 SiC/45	2500	0,54	2500	0,60	1250	0,54	1250	0,70
	Al-%32 SiC/45	625	0,75	625	0,61	625	0,57	625	0,50
	Al-%8 SiC/110	1250	0,56	625	0,61	625	0,80	625	1,20
Kaplamalı sementit karbür	Al-%8 SiC/30	6250	0,50	6250	0,55	5000	0,52	2500	0,54
	Al-%16 SiC/30	5000	0,50	3750	0,53	3750	0,56	1250	0,5
	Al-%32 SiC/30	1250	0,60	625	0,55	625	0,59	625	0,65
	Al-%8 SiC/45	3750	0,50	3750	0,57	2500	0,53	1250	0,54
	Al-%16 SiC/45	2500	0,52	2500	0,56	1250	0,52	1250	0,67
	Al-%32 SiC/45	1250	0,52	1250	0,60	625	0,55	625	0,64
	Al-%8 SiC/110	1250	0,52	625	0,57	625	0,76	625	0,96

İşlenen bütün malzemelerde aşındırıcı SiC parçacıklar nedeniyle hızlı takım aşınması meydana gelmiştir. Kesme hızı, MMK malzeme içerisindeki SiC parçacık oranı ve boyutu, kesici takım aşınmasında en etkin faktörler olarak bulunmuştur. İşlenen bütün malzemelerde artan kesme hızı, parçacık oranı ve parçacık boyutuyla takım ömrü azalmıştır. En büyük parçacık olan 110 µm boyutlu parçacıkla ağırlıkça % 8 oranında takviyeli MMK malzemenin her iki kesici takımla da işlenmesinde bütün kesme hızlarında diğer malzemelere göre oldukça yüksek kesici takım aşınması gerçekleşmiştir.

SiC parçacık takviyeli MMK malzemelerin, sementit karbür kesici takımlarla işlenmesinde etkin olan takım aşınma mekanizmasının abrasif aşınma olduğu çeşitli araştırmacılar tarafından belirtilmiştir (79,84,85). Kesici takımın aşınan bölgelerinin tarama elektron mikroskobu (SEM) ile incelenmesi sonucu abrasif aşınmanın da iki-gövdeli ve üç-gövdeli olmak üzere iki kısma ayrılabilceği ve bu malzemelerin işlenmesi esnasında her ikisinin de etkin olduğu belirtilmiştir. İki-gövdeli abrasif aşınma sert bir cismin daha az sertlikteki bir cisme sürtünmesi sonucu gerçekleşen aşınma olup üç-gövdeli abrasif aşınma ise sert parçacıkların sürtünen iki cisim arasında kalarak oluşturduğu aşınmadır (85). Li ve Seah (85) çeşitli oranlarda ve çeşitli boyutlarda SiC parçacık takviyeli 2024-Al matrisli MMK malzemelerin sementit karbür kesici takımlarla işlenmesi ile ilgili yaptıkları çalışmalarında SEM ile inceleme sonucunda kesici takımın aşınan yüzeyinde iki-gövdeli ve üç-gövdeli abrasif aşınma olduğunu belirtmişlerdir. İki-gövdeli abrasif aşınma aşınan bölgedeki abrasif izlerden rahatlıkla görülebilmektedir fakat üç-gövdeli abrasif aşınma açıkça görülememiş ve aşınan bölgedeki bir takım hatalardan tahmin edilmiştir.

Şekil 5.13'deki SEM fotoğrafı Al-%8 SiC/45 MMK malzemenin 20 m/min kesme hızında kaplamasız kesici takımla işlenmesi sonucu kesici takımda oluşan aşınmaları göstermektedir. Kesici takımın talaş yüzeyinden çekilen bu fotoğraftan az miktarda krater aşınması ve kesici uçta aşınma sonucu içeriye doğru girinti oluşması da yan yüzey aşınmasını göstermektedir. Kesici uçta düzenli bir aşınmanın oluşu ve takım mikroskobu ile yapılan incelemeler kesici takım yan yüzeyinde abrasif aşınma mekanizmasının hakim olduğunu göstermektedir. Ayrıca daha önce yapılan

çalışmalarda da (79,84,85) SiC_p takviyeli MMK malzemelerin işlenmesinde yan yüzeyde abrasif aşınmanın hakim olduğu belirtilmiştir.

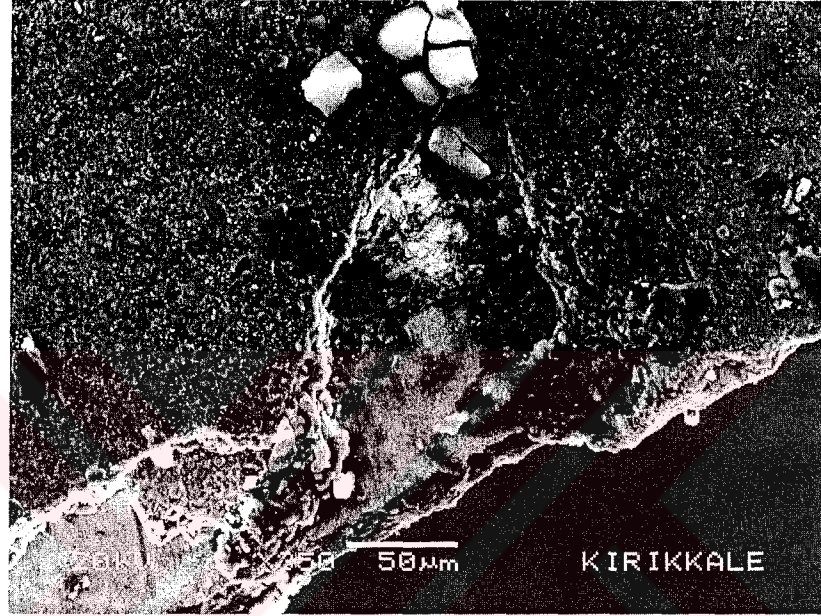


şekil 5.13. Al-%8 SiC/45 MMK malzemenin 20 m/min kesme hızında kaplamasız sementit karbür kesici takım ile işlenmesi sonucu kesici takımda oluşan yan yüzey ve krater aşınmaları

Ayrıca, 30 μm boyutlu parçacıkla % 16 oranında takviyeli MMK malzemenin kaplamasız kesici takım ile 20 m/min kesme hızında işlenmesi esnasında kesici takımın talaş yüzeyine nüfuz eden ve dört parçaya bölünen SiC parçacık şekil 5.14'deki SEM fotoğrafindan açıkça görölmektedir. Bu üç-gövdeli abrasif aşınma mekanizmasının bir göstergesidir.

Kesme esnasında iş parçası birinci deformasyon bölgesinde deforme olup ikinci deformasyon bölgesinden kesici takım talaş yüzeyinden geçerken yüksek ısı ve basınç sonucu kesici takıma yapışır. Yüksek ısı ve basınç nedeniyle burada basit bir sürtünmeden ziyade yapışma olduğu daha önceden belirtilmişti. Bu yüksek ısı ve basıncın talaşı yumuşatıp içindeki takviye elemanının talaştan ayrılıp takım-talaş arayüzeyindeki yüksek basınç nedeniyle takviye elemanından daha az sertlikte olan kesici takıma nüfuz etmesini sağlar. Takım-talaş arayüzeyinde talaştan ayrılan SiC parçacık yüksek basınç nedeniyle kesici takıma nüfuz edip deformasyona uğratar ve

üç-gövdeli abrasif aşınmaya sebep olur. Ayrıca bu deformasyon esnasındaki yüksek basınç ve kesici takımın gösterdiği direnç nedeniyle SEM fotoğrafında görüldüğü gibi SiC parçacık dört parçaya ayrılmıştır. Bu bölgede görülen diğer parçacıklar ve yapışan matris malzemesi aşınmanın oluşumunda üç-gövdeli abrasif ve adhesiv aşınma mekanizmalarının etkin olduğuna işaret eder.



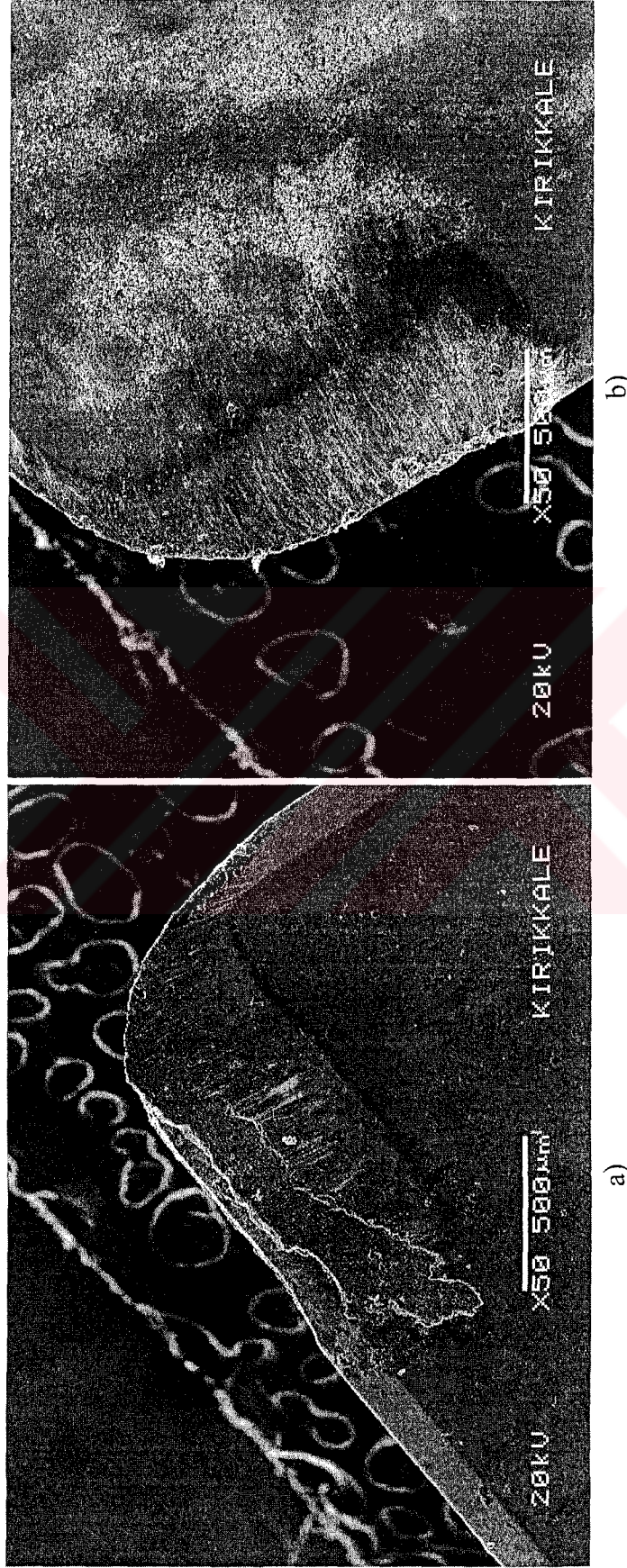
Şekil 5.14. Al-%16 SiC/30 MMK malzemenin 20 m/min kesme hızında kaplamasız sementit karbür kesici takımla işlenmesi sonucu kesici takımda gerçekleşen üç-gövdeli abrasif aşınma mekanizması

Üç-gövdeli abrasif aşınma SEM fotoğrafından görüldüğü gibi talaş yüzeyinde oluşmuştur fakat kesici uca oldukça yakın bir mesafededir. SiC parçacığının takıma nüfuz etmesi sonucu kesici ucun hemen gerisinde bir boşluk oluşmuştur. Bu boşluk nedeniyle kesme işleminin devam etmesi sonucu, kesici ucun oluşan bu boşluğa bağlı olarak dayanımı azalıp daha kolay kırılarak yan yüzey aşınmasını hızlandırması oldukça muhtemeldir.

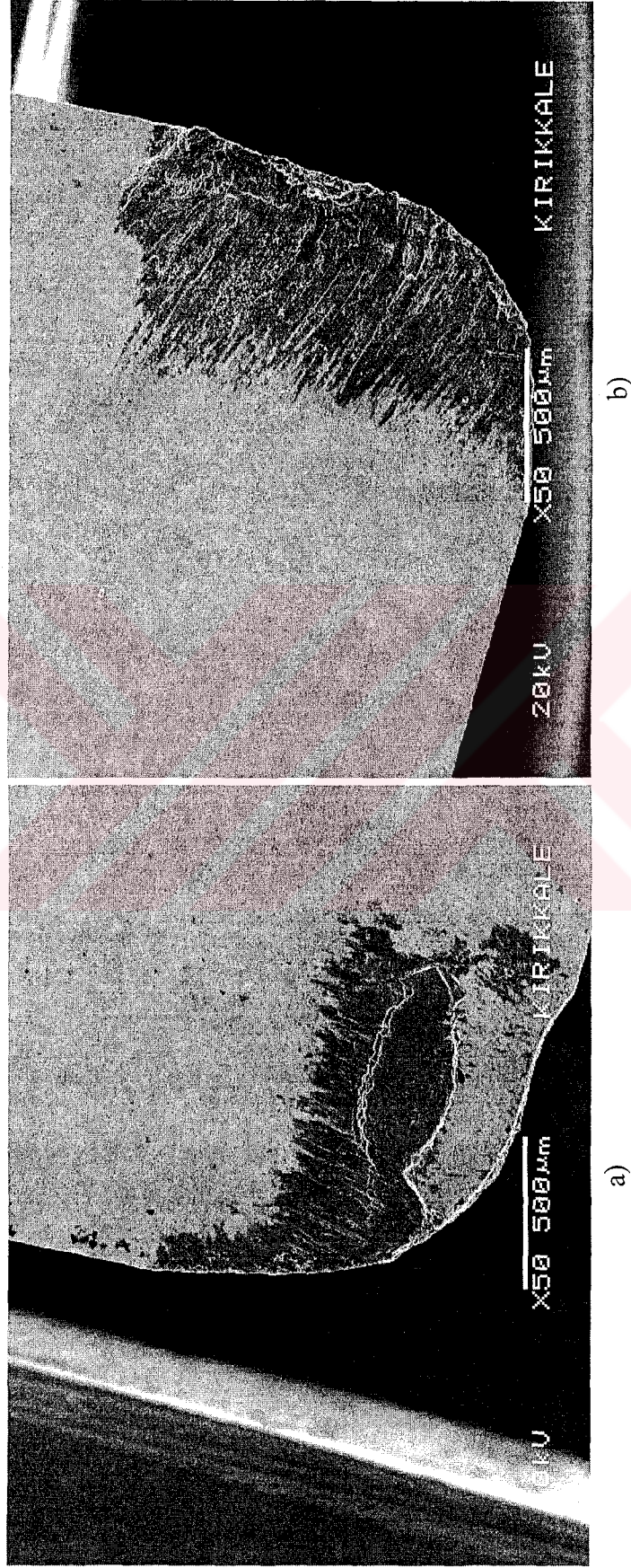
Kesici uçların tarama elektron mikroskobu (SEM) ile incelenmesi sonucunda kesme hızının artmasıyla birlikte kesici uçta kırılmalar olduğu görülmüştür. Şekil 5.15, Al-%8 SiC/45 MMK malzemenin kaplamalı kesici takımla 20 ve 80 m/min kesme hızlarında 0,5 mm yan yüzey aşınması gerçekleşene kadar talaş kaldırılması sonucu

kesici takımın kesici uçlarında oluşan aşınmaları göstermektedir. Benzer şekilde, Şekil 5.16 da kaplamasız kesici takımla 20 ve 80 m/min kesme hızlarında 0,5 mm yan yüzey aşınması gerçekleşene kadar talaş kaldırılması sonucu kesici takımın kesici uçlarında oluşan aşınmaları göstermektedir. Bu nedenle artan kesme hızıyla takım aşınmasının artışı, kırılmaların önemli bir etkiye sahip olduğu söylenebilir.

Mikroskop altında yapılan incelemelerde kesme bölgesinde kaplamanın tamamen aşındığı görülmeye rağmen Çizelge 5.2 incelendiğinde kaplamalı kesici takımın işlenen bütün malzemelerde takım ömrü yönünden performansının daha iyi olduğu görülmektedir. Kesme bölgesinde kaplamanın tamamen aşınması durumunda bile TiC kaplamanın yan yüzeyi koruyucu etki sağladığı literatürde vurgulanmıştır (83). TiC, sementit karbürden daha sert olduğu için belirli bir kalınlığa sahip TiC kaplamanın aşınma bölgesine taşınarak bir miktar koruyucu etki sağlayacağı belirtilmiştir (83). Bu durum, genel olarak sert parçacıklar içeren malzemelerin işlenmesinde kaplamalı sementit karbür kesici takımların kaplamasız olanlardan neden daha iyi performans gösterdiğini kısmen açıklar. Ayrıca, K10 sementit karbür alt tabakadan daha sert olan kaplama, SiC parçacıkların kesici takım talaş yüzeyine daha kolay nüfuz etmelerini engelleyerek kesici takımın ucunun dayanımını artırır.



Şekil 5.15. Al-%8 SiC/45 MMK malzemenin kaplamalı sementit karbür kesici takımla a) 20 m/min ve b) 80 m/min kesme hızlarında işlenmesi sonucu oluşan kesici takım aşınmaları



Şekil 5.16. Al-%8 SiC/45 MMK malzemenin kaplamasız sementit karbür kesici takımla a) 20 m/min ve b) 80 m/min kesme hızlarında işlenmesi sonucu oluşan kesici takım aşınmaları

5.4.1.2. Yüzey pürüzlülüğü

Yüzey pürüzlülüğü ölçümleri her bir kesici takım ile ilk talaş kaldırma işleminden sonra yapılmıştır. Ölçülen değerler Çizelge 5.3'te tablo halinde verilmiştir. Kesme hızı, parçacık boyutu ve parçacık içeriği ile yüzey pürüzlülük değerlerinde belirgin bir değişim görülmemekle birlikte çoğunlukla kaplamasız kesici takımlarla ölçülen ortalama yüzey pürüzlülük (R_a) değerleri daha düşüktür. Çizelge 5.3'ten her iki kesici takım ile elde edilen yüzeylerin ortalama pürüzlülük değerlerinin (R_a) kesme hızı, MMK malzemelerin içerisindeki SiC parçacıkların oranı ve büyüklüğüne göre önemli derecede değişmediği görülmektedir. Bu durum sementit karbür kesici takımlarla MMK malzemelerin işlenmesinde hızlı kesici takım aşınması sebebiyle işlenen yüzeyin aşırı deformasyona uğraması (79,94) ile açıklanabilir. Hızlı takım aşınması sonucu kesici uç kesmeden ziyade yüzeyde sıvamaya neden olduğu için işlenen malzemelerin R_a değerlerinde fazla bir farklılık görülmeyebilir. Ayrıca düşük kesme hızlarında MMK malzemeleri sementit karbür kesici takımlarla işlerken BUE oluşumu (82,95) ve yüksek kesme hızlarında da kesici uçlardaki kırılmalar, yüzey pürüzlülüğünü doğrudan etkileyeceği için kesme hızı ve malzeme mikroyapısına göre yüzey pürüzlülüğünde belirli bir eğilimin oluşması engellenebilir.

Çizelge 5.3. Kaplamasız (Hti10) ve kaplamalı (UC5005) sementit karbür kesici takımlarla elde edilen ortalama yüzey pürüzlülük (R_a) değerleri

Kesme hızı (m/min) İş parçası	20		40		60		80	
	Hti10	UC5005	Hti10	UC5005	Hti10	UC5005	Hti10	UC5005
Al-%8 SiC/30	1,54	2,13	2,49	2,80	2,40	2,58	2,90	2,56
Al-%16 SiC/30	1,85	2,09	2,23	2,33	2,46	2,29	3,14	2,74
Al-%32 SiC/30	1,10	1,05	1,78	1,80	1,65	1,50	1,50	1,25
Al-%8 SiC/45	1,74	1,90	2,26	2,85	2,01	2,10	2,72	2,63
Al-%16 SiC/45	1,98	2,27	2,43	2,90	2,48	2,51	2,85	2,75
Al-%32 SiC/45	2,05	1,80	3,54	3,00	3,08	2,95	2,53	2,85
Al-%8 SiC/110	2,02	2,06	2,11	2,50	2,08	2,75	2,53	2,98

İşlenmiş yüzeylerden ölçülen yüzey pürüzlülüğü değerlerinden (Çizelge 5.3), genellikle düşük kesme hızlarında kaplamasız kesici takımlarla elde edilen yüzey pürüzlülük değerlerinin kaplamalı kesici takımlarla elde edilenlerden daha düşük olduğu görülmektedir. Bu durum, kaplamalı kesici takımlarda, kaplamasız kesici takımlara göre daha durağan ve büyük yığıntı talaş oluşumu ile açıklanabilir. Normalde yığıntı talaşın varlığı ani durdurma tertibatıyla belirlenebilmekle birlikte bazı durumlarda yüksek yüzey pürüzlülük değerleri de yığıntı talaşın varlığını gösterebilir. Kesici uç üzerindeki yığıntı talaş kesici takım üzerinden iş parçası malzemesine doğru çıkıntı oluşturarak talaş derinliğini ve dolayısı ile bu çıkıntı düzensiz bir yapıya sahip olacağı için yüzey pürüzlülüğünü artırır (66). Bu nedenle, daha büyük R_a değerleri kaplamalı kesici takımlarda daha büyük yığıntı talaş oluşumuna işaret edebilir. Ayrıca, SEM fotoğraflarından da görüldüğü gibi kaplamalı kesici takımın kesici ucunda bir miktar pah mevcuttur (Şekil 5.15 a)). Bu pah da yığıntı talaş oluşumuna katkıda bulunacağı için yüzey pürüzlülüğündeki artışta bir rolü olabilir (60).

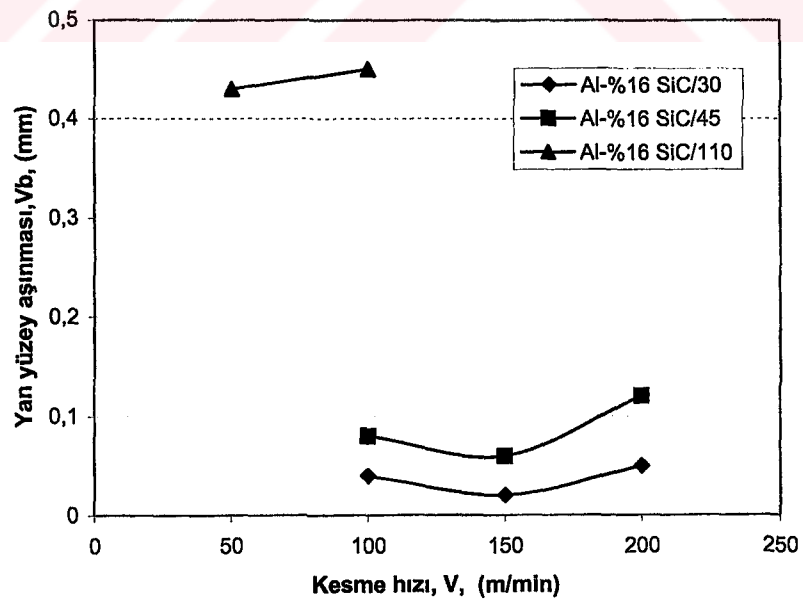
İlave olarak, bazı durumlarda yığıntı talaş, kesici takımın yan yüzeyini SiC parçacıkların abrasif etkisine karşı koruyabileceği (66) için, kaplamalı kesici takımların kaplamasız kesici takımlardan yüksek olan aşınma direncinin bir sebebi de kaplamalı kesici takımlarda daha büyük yığıntı talaş oluşumuyla da açıklanabilir.

Şekil 5.15 ve Şekil 5.16'daki SEM fotoğraflarından görüldüğü gibi yüksek kesme hızlarında kaplamasız kesici takımın ucundaki kırılmalar kaplamalı kesici takımın ucundaki kırılmalarından daha büyük olduğu için daha kaba bir yüzeye neden olur. Kaplamasız kesici takıma SiC parçacıkların nüfuz etme ihtimali yüksek olduğu için daha fazla uç kırılmasına maruz kalabilecekleri daha önceden belirtilmiştir (Şekil 5.14).

5.4.2. Kübik bor nitrit kesici takımlar

5.4.2.1. Kesici takım yan yüzey aşınması

Sementit karbür kesici takımlarda elde edilen ön bulgular ışığında, kübik bor nitrit (CBN) kesici takımın oldukça yüksek maliyeti nedeniyle, deneyler yalnızca ağırlıkça % 16 oranında üç farklı boyutlardaki parçacıkları içeren üç ayrı MMK malzeme üzerinde yapılmıştır. CBN kesici takımla da yapılan deneylerde, sementit karbür kesici takımlarda olduğu gibi sabit talaş derinliği, sabit ilerleme hızı ve farklı kesme hızlarında belirli bir hacimde talaş kaldırılması sonucu gerçekleşen yan yüzey aşınmasının ölçülmesi hedeflenmiştir. CBN kesici takımların sementit karbür kesici takımlara göre daha üst düzeyde olan özellikleri nedeniyle kaldırılan talaş miktarı 2500 mm^3 'e çıkarılmıştır. Şekil 5.17, bu üç MMK malzemenin farklı kesme hızlarında işlenmesi sonucu CBN kesici takımlarda oluşan yan yüzey aşınmalarını göstermektedir. Şekilden de görüldüğü gibi CBN kesici takım aşınması aşırı derecede parçacık büyüklüğüne duyarlıdır.

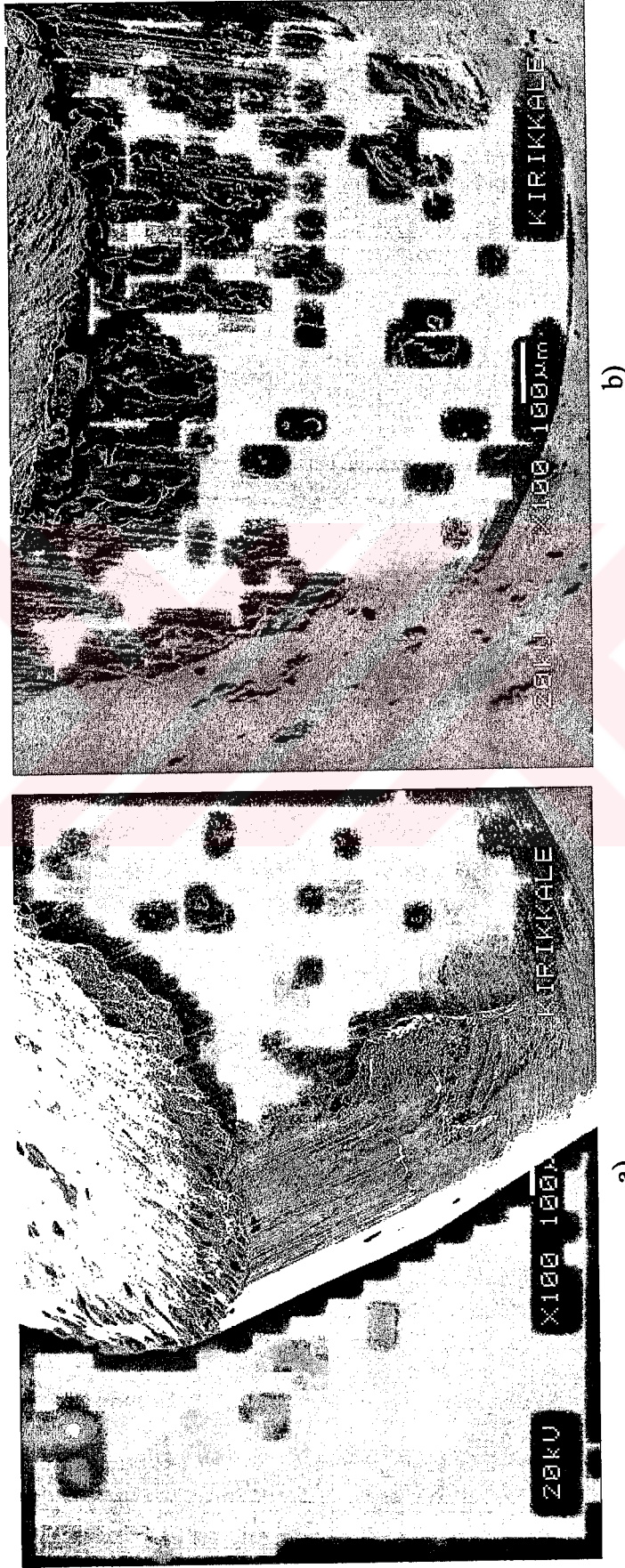


Şekil 5.17. CBN kesici takımlarda yan yüzey aşınmaları

Parçacık takviyeli MMK malzemelerin içerisindeki SiC ve Al_2O_3 gibi takviye elamanları günümüzde imalat endüstrisinde yaygın olarak kullanılan sementit karbür

kesici takımlardan daha sert ve çeşitli seramik kesici takımların temel maddeleri olduğu için, parçacık takviyeli MMK malzemelerin işlenmesi için çoğunlukla çok sert olan çok kristalli elmas (PCD) kesici takımlar tavsiye edilmektedir (5,77,92). Bu malzemelerin işlenmesi ile ilgili çalışmaların büyük çoğunluğu PCD kesici takımlar kullanılarak yapılmıştır. Bu çalışmalarda uygun kesme parametreleri, takım aşınma biçimleri ve mekanizmaları belirlenmeye çalışılmıştır. Çoğunlukla sertleştirilmiş çeliklerin işlenmesinde kullanılan kübik bor nitrit (CBN) kesici takımlar sertlikte PCD kesici takımlardan hemen sonra gelmelerine rağmen parçacık takviyeli MMK malzemelerin CBN kesici takımlarla işlenmesi ile ilgili oldukça az çalışma mevcuttur (82,94). Looney et. al (82) ve Hung et. al'ın (94) deneysel bulgularına dayanarak CBN kesici takımların da parçacık takviyeli MMK malzemelerin işlenmesinde alternatif olabileceği anlaşılmaktadır.

Bu çalışmada bu amaçla MMK malzeme içerisindeki takviye elamanı boyutu ve kesme hızının takım aşınması ve yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Şekil 5.17, her üç malzeme için farklı kesme hızlarındaki takım yan yüzey (V_b) aşınmalarını göstermektedir. 110 μm boyutlu parçacıklarla takviyeli MMK malzemeler için 50 ve 100 m/min kesme hızlarında deneyler yapılmış ve her iki kesme hızında da oldukça yüksek takım aşınması gerçekleşmiştir. Kesici uçların optik mikroskop altında incelenmesiyle kesici uçlarda kırılmalar ve yapışan iş parçası malzemesi görülmüştür. Kesici ucun yan yüzey bölgesinde yapışan iş parçası malzemesinin bittiği yerde kesici takımlarda kırılmalar olduğu takım mikroskopunda dahi rahatlıkla görülebilmektedir. Yapılan ölçümlerle her iki kesme hızında da yaklaşık olarak 0,5 mm yanak aşınması gerçekleşmiştir. Bu aşınma değeri oldukça yüksek olduğu için CBN kesici takımların büyük boyutlu SiC parçacıklarla takviyeli MMK malzemelerin işlenmesinde ekonomik olarak kullanılamayacağı sonucu çıkarılmıştır. Şekil 5.18 a) ve b)'deki SEM fotoğraflarından 110 μm boyutlu parçacıklarla takviyeli MMK malzemelerin 50 ve 100 m/min kesme hızlarında işlenmesi sonucu kesici takımında oluşan kırılmaları görülmektedir.

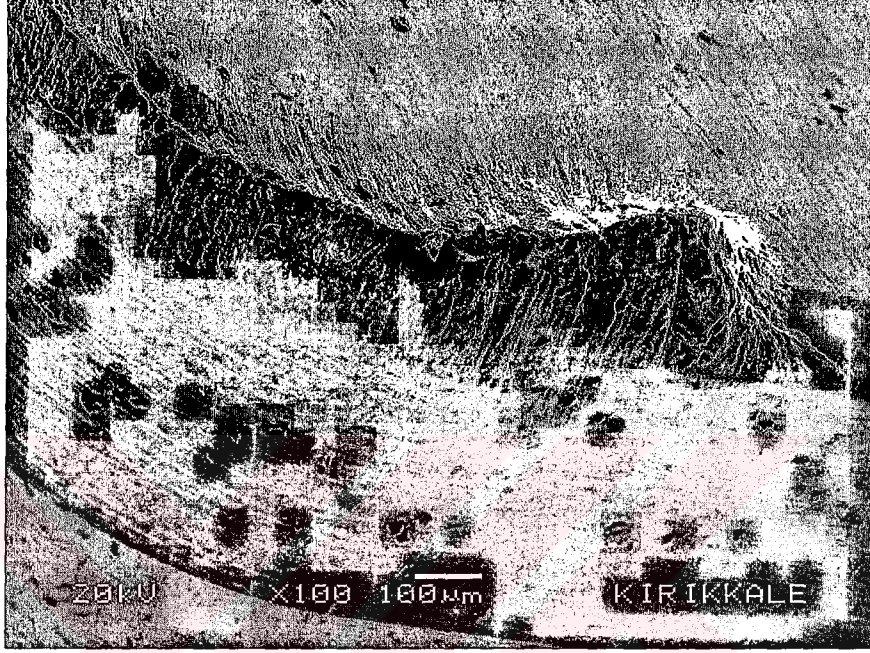


Şekil 5.18. Al-%16 SiC/110 MMK malzemenin CBN kesici takımla a) 50 m/min ve b) 100 m/min kesme hızlarında işlenmesi sonucu kesici takımında oluşan kırılmalar

30 ve 45 μm parçacıkla takviyeli MMK malzemelerin işlenmesi için deneyler 100, 150 ve 200 m/min kesme hızlarında gerçekleştirilmiştir. Her üç kesme hızında da 110 μm parçacık takviyeli MMK malzemeye göre oldukça düşük kesici takım yan yüzey aşınması gerçekleşmiştir. Şekil 5.17'den kesme hızına göre aşınma incelendiğinde 150 m/min kesme hızında her iki malzemede de en düşük aşınma gerçekleştiği görülmektedir. Bu değer altındaki ve üstündeki kesme hızlarında aşınma artmıştır. Metal kesme işleminde kesme hızının artması ile aşınmanın da artması genelde beklenen bir durumdur. Artan kesme hızıyla aşınmanın azalması ise bazı durumlarda görülür. Bu çalışmada iş parçası alüminyum esaslı olduğu için yığıntı talaş eğilimi yüksektir ve buradaki aşınma düşük kesme hızında yığıntı talaş oluşumunun daha etkin olmasıyla ve periyodik olarak bu yığıntı talaşın kopmasıyla açıklanabilir. Bu kopma esnasında bir kısım kesici takım malzemesinin de koparak kesici takımın aşınmasında adhesiv aşınma mekanizmasının etkin olduğu tahmin edilmektedir. Kesme hızının 100 m/min'den 150 m/min'e çıkarılmasıyla yığıntı talaş oluşumunun azaldığı tahmin edilmiştir.

Bu iki malzemenin işlenmesinde kullanılan CBN kesici takım aşınmalarını daha ayrıntılı inceleyebilmek için kesici uçlar SEM ile incelenmiştir. Her iki malzemenin de 100 ve 150 m/min kesme hızlarında işlenmesi sonucu kesici uçlardaki aşınan bölgeler SEM fotoğraflarından görülebilmekle birlikte iş parçası malzemesi aşınan bölgelere sıvandığı için (Şekil 5.19) etkin olan aşınma mekanizması tam olarak belirlenememiştir. Andrewes et.al (86) PCD kesici takımlarla MMK malzemelerin işlenmesinde aşınmanın öncelikle takviye elamanı parçacıklarının abrasif etkisiyle başlayarak kesici takım üzerinde abrasif izler oluştuğunu ve daha sonra da oluşan abrasif izlere iş parçası malzemesinin yapıştığını ve yapışan bu malzemenin kopup giderken de bir kısım kesici takım malzemesini alıp götürdüğünü belirtmişlerdir. Bu çalışmada da benzer bir mekanizmanın kesici takım yan yüzey aşınmasında etkin olduğu tahmin edilmiştir. Kesici takım ucunda bir miktar pah olması ve parçacık boyutlarının da nispeten küçük olması nedeniyle başlangıçta kesici takımda kırılmadan ziyade abrasif aşınma etkin olabilir. Oluşan bu abrasif izlere periyodik

olarak iş parçası malzemesinin yapışması ve daha sonra kopması durumunda aşınma gerçekleşir.



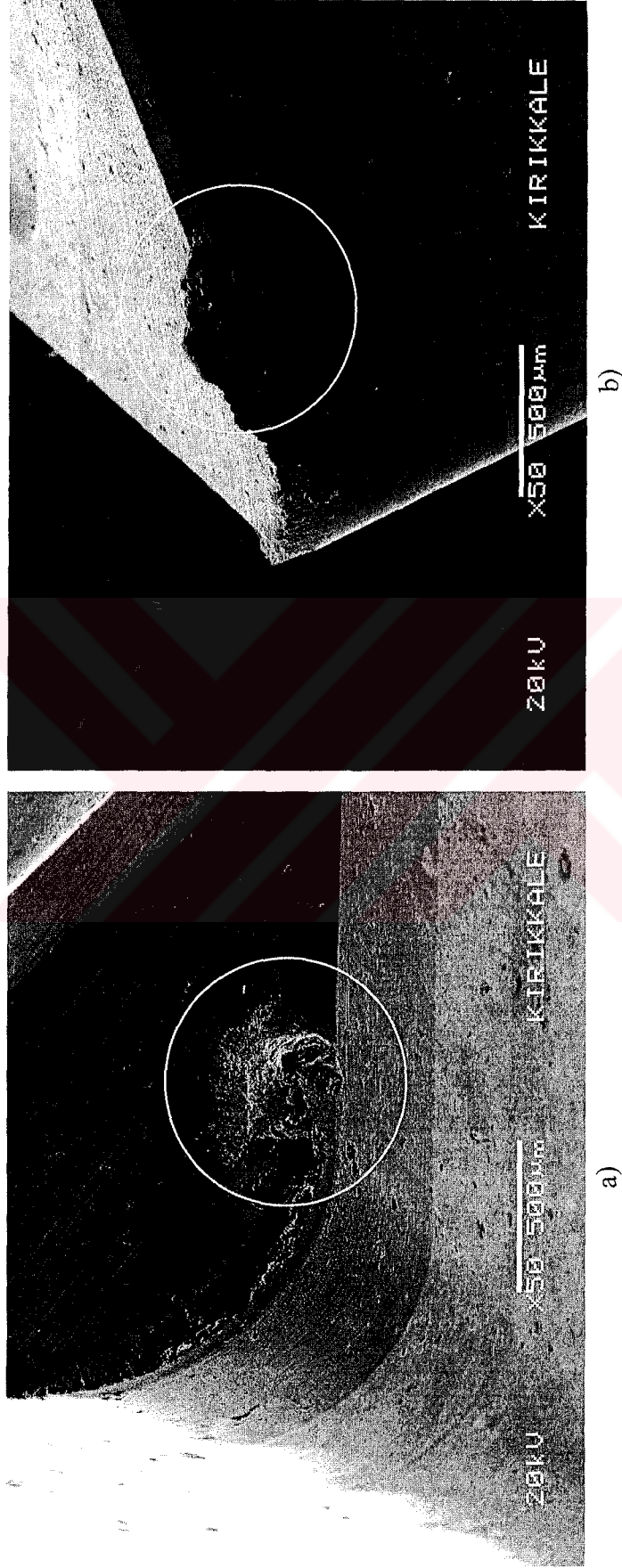
Şekil 5.19. Al-%16 SiC/45 MMK malzemenin CBN kesici takımla 100 m/min kesme hızında işlenmesi sonucu kesici takımın aşınan bölgelerine sıvanan iş parçası malzemesi

Kesme hızı 100 m/min'den 150 m/min'e çıkarıldığında sıcaklık artar ve dolayısıyla sıvanan iş parçası malzemesi ve yığıntı talaş ısıl olarak yumuşar. Bu yumuşama sonucu, sıvanan talaşın dayanımı azalacağı için kesici takımdan koparken daha az miktarda bir kesici takım malzemesini beraberinde getirir. Bu durum 150 m/min kesme hızında gerçekleşen daha az takım aşınmasının bir sebebi olabilir. Şekil 5.20 a)'daki SEM fotoğrafı Al-%16 SiC/30 MMK malzemenin 100 m/min kesme hızında işlenmesi sonucu kesici takım talaş yüzeyinde oluşan kırılmayı göstermektedir. Bu durum yukarıda açıklandığı gibi düşük kesme hızında yığıntı talaş ve sıvanan iş parçası malzemesinin kesici takım malzemesini koparmasının daha muhtemel olduğuna işaret eder.

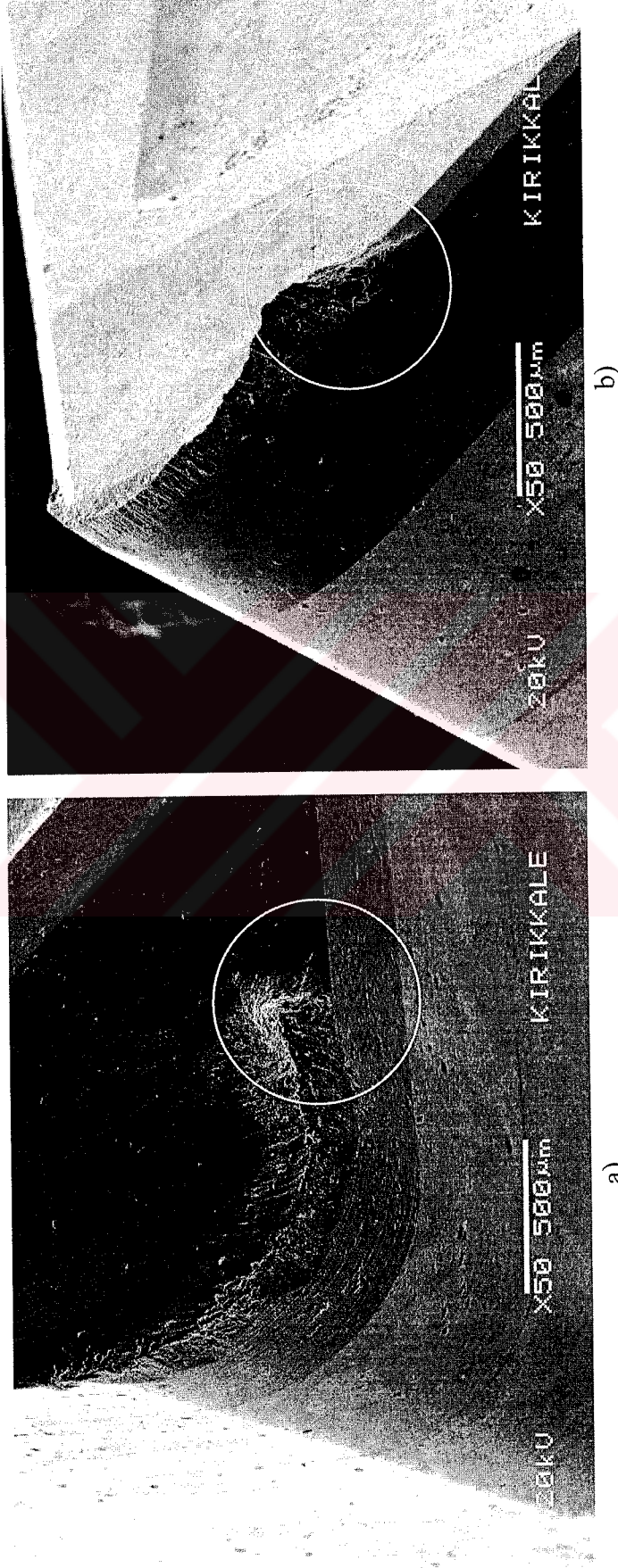
100 m/min kesme hızında oluşan yığıntı talaşın şekli ile 150 m/min kesme hızında oluşan yığıntı talaşın şeklinin farklı olduğu her iki malzemenin işlenmesinde

kullanılan kesici takımlarda da görülmüştür. Şekil 5.20 a) ve Şekil 5.21 a)'daki SEM fotoğraflarından görüldüğü gibi 100 m/min'de kesici takımın iş parçasının işlenmemiş yüzeyine karşılık gelen kısmı üzerinde oluşan yığıntı talaşlar daha dar bir bölgede kalmıştır. Şekil 5.20 b) ve Şekil 5.21 b)'deki fotoğraflar incelendiğinde ise 150 m/min'de yığıntı talaşın daha geniş bir bölgeye yayıldığı görülmektedir. Bu durum da artan kesme hızı sonucu sıcaklığın artmasıyla açıklanabilir. Yüksek sıcaklıkta talaşın yumuşaması sonucu üzerine gelen basınç nedeniyle yığıntı talaş daha geniş bir bölgeye yayılır.

100 m/min kesme hızında sıcaklık daha az olduğu için, yığıntı talaş daha kararlı bir yapıya sahip olur. Talaş kaldırma esnasında yeni oluşan iş parçası yüzeyi yığıntı talaşla temas halinde olduğu için yığıntı talaşın üzerine gelen kuvvetler nedeniyle kopması ve dolayısıyla bir miktar kesici takım malzemesini de beraberinde getirmesi oldukça muhtemeldir. Ayrıca, yığıntı talaş içerisindeki sert parçacıkların yeni oluşan iş parçası yüzeyi ile kesici takım boşluk yüzeyi arasında kalarak sürtünme sonucu yan yüzey aşınmasını artırması da muhtemeldir. 150 m/min kesme hızında ise yığıntı talaş ısı olarak yumuşadığı için talaş kaldırma esnasında üzerine gelen kuvvetler nedeniyle koparak beraberinde kesici takım malzemesi getirmesi ve içerisindeki sert parçacıkların yeni oluşan iş parçası yüzeyi ile kesici takım boşluk yüzeyi arasında kalması daha az muhtemeldir. Isıl olarak yumuşama sonucu, yığıntı talaş kesici ucun gerisine doğru yayılır (Şekil 5.20 b) ve Şekil 5.21 b)) ve aynı zamanda yığıntı talaş içerisindeki sert parçacıkların da koparak yan yüzeyde aşınmayı hızlandırması ihtimali daha azdır. Bu durum, kesme hızının 100 m/min'den 150 m/min'e çıkılması halinde azalan kesici takım aşınmasını açıklamaktadır.

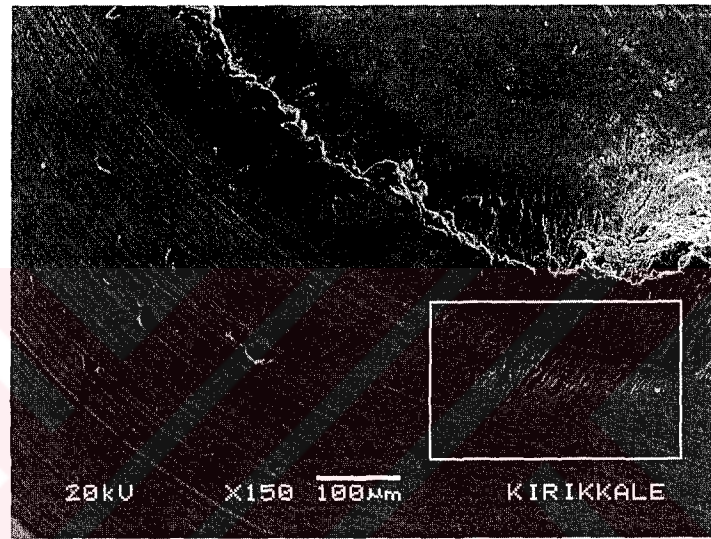


Şekil 5.20. Al-%16 SiC/30 MMK malzemenin CBN kesici takımla a) 100 m/min ve b) 150 m/min kesme hızlarında işlenmesi sonucu kesici takım üzerinde oluşan yığıntı talaşlar

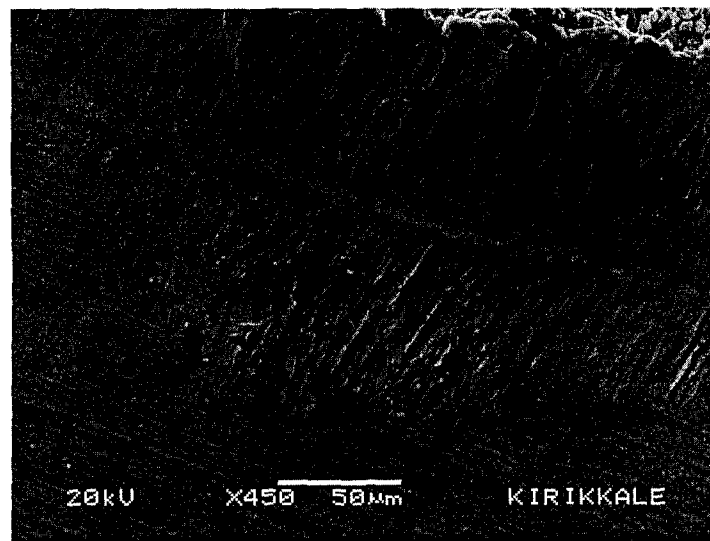


Şekil 5.21. Al-16SiC/45 MMK malzemenin CBN kesici takımla a) 100 m/min ve b) 150 m/min kesme hızlarında işlenmesi sonucu kesici takım üzerinde oluşan yığıntı talaşlar

200 m/min kesme hızına çıkılmasıyla her iki malzemenin işlenmesinde kesici takım aşınması tekrar artma eğilimi göstermiştir. SEM fotoğraflarından, kesici takımın iş parçasının işlenmemiş yüzeyine gelen kısmında oluşan abrasif izler rahatlıkla görülebilmektedir (Şekil 5.22). Bu bölge daha ayrıntılı incelendiğinde ise abrasif izlerle birlikte iş parçasının bu izlere yapışması ve kopup giderken de bir miktar kesici takım malzemesini koparmasıyla oluşan aşınmalar da görülmektedir (Şekil 5.23).



Şekil 5.22. Al-%16 SiC/30 MMK malzemenin CBN kesici takımla 200 m/min kesme hızında işlenmesi sonucu kesici takımda oluşan aşınma



Şekil 5.23. Şekil 5.22'deki dikdörtgen alanın daha ayrıntılı olarak gösterilmesi

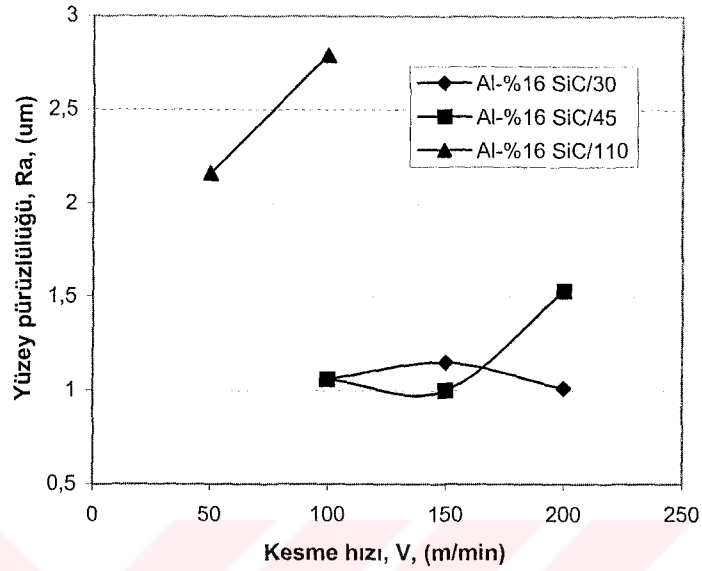
5.4.2.2. Yüzey pürüzlülüğü

Üç farklı MMK malzeme üzerinde bütün kesme hızlarındaki deneylerde elde edilen yüzeylerin ortalama pürüzlülük değerleri (R_a) Şekil 5.24’de verilmektedir. Bu grafikten görüldüğü gibi en büyük parçacıkla (110 μm) takviyeli MMK malzemede her iki kesme hızında da diğer iki MMK malzemedenden elde edilenlerden daha yüksek pürüzlülük değerleri elde edilmiştir. Bu malzeme için yüzey pürüzlülük değerleri 50 m/min kesme hızında 2,79 μm , 100 m/min kesme hızında ise 2,16 μm olmuştur. Takviye elemanı parçacık boyutunun büyük olması ve takım mikroskobu ile dahi görülebilen kesici takım uçlarındaki kırılmalar diğer iki malzeme için elde edilen pürüzlülük değerlerinden oldukça yüksek olan yüzey pürüzlülük değerlerinin sebepleri olarak düşünülmektedir. Ayrıca, Şekil 5.3’deki bu malzemeye ait mikroyapı fotoğrafından görüldüğü gibi kırılan parçacıklar ve malzeme yapısındaki boşluklar da yüksek pürüzlülük değerlerinin nedeni olabilir.

Al-%16 SiC/45 MMK malzemenin 200 m/min kesme hızında işlenmesi haricinde Al-%16 SiC/30 ve Al-%16 SiC/45 MMK malzemelerden elde edilen yüzey pürüzlülük değerlerinde ise takviye elemanı boyutu ve kesme hızına bağlı olarak belirgin bir farklılık gözlemlenmemiştir. Bu iki malzemenin içerdikleri takviye elemanı boyutlarının fazla farklı olmaması (30 ve 45 μm) bu durumun bir sebebi olarak yorumlanmıştır. Ayrıca, bu tür kompozit malzemelerin mikroyapılarında bir takım düzensizliklerin oldukça muhtemel olması da diğer bir sebep olabilir (79).

200 m/min kesme hızında Al-%16 SiC/45 MMK malzemenin işlenmesinde yüzey pürüzlülük değerinin yüksek çıkması ise bu kesme hızında kesici takım aşınmasının diğerlerine göre yüksek olması ile açıklanabilir, (Şekil 5.17). Burada takım aşınmasının iki muhtemel sebebi olabilir. Malzemenin bu kısmında muhtemel parçacık kümelenmesi sonucu kesici takımın fazla parçacık nedeniyle daha fazla aşınmaya maruz kalması ve aynı zamanda yoğun olan parçacıklar dolayısı ile daha kaba bir yüzey oluşması bu iki muhtemel nedenden biri olabilir. Parçacık boyutunun

nispeten büyük ve kesme hızının da 200 m/min olmasının kesici uç kırılmalarını kolaylaştırması diğer bir sebep olabilir.



Şekil 5.24. CBN kesici takımlarla elde edilen ortalama yüzey pürüzlülük (R_a) değerleri

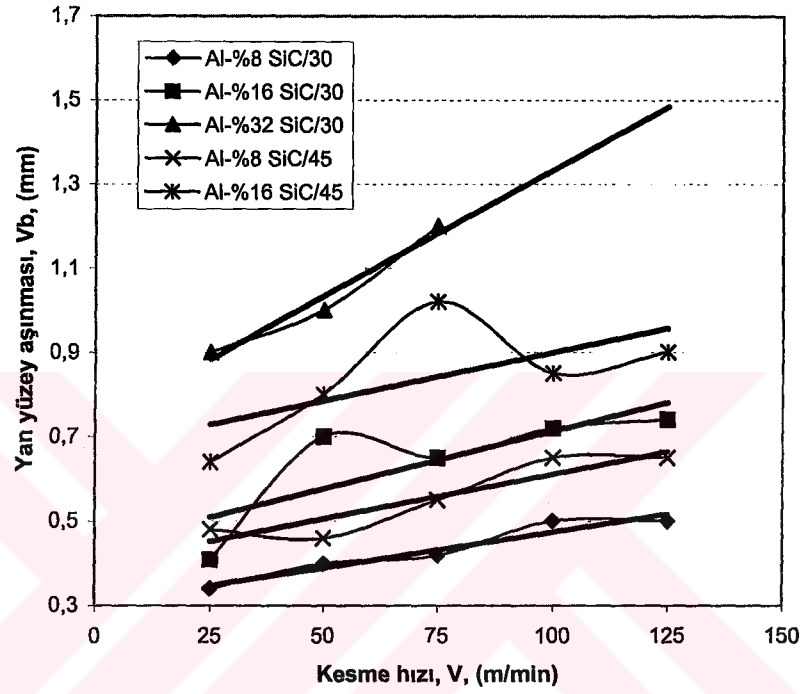
5.4.3. CVD elmas kaplamalı sementit karbür kesici takımlar

5.4.3.1. Kesici takım yan yüzey aşınması

Şekil 5.25 1 mm talaş derinliği ve 0,12 mm/rev ilerleme hızında iş parçası malzemelerinden farklı kesme hızlarında 2500 mm³ talaş kaldırılması sonucu CVD elmas kaplamalı sementit karbür kesici takımlarda gerçekleşen yan yüzey aşınmalarını göstermektedir.

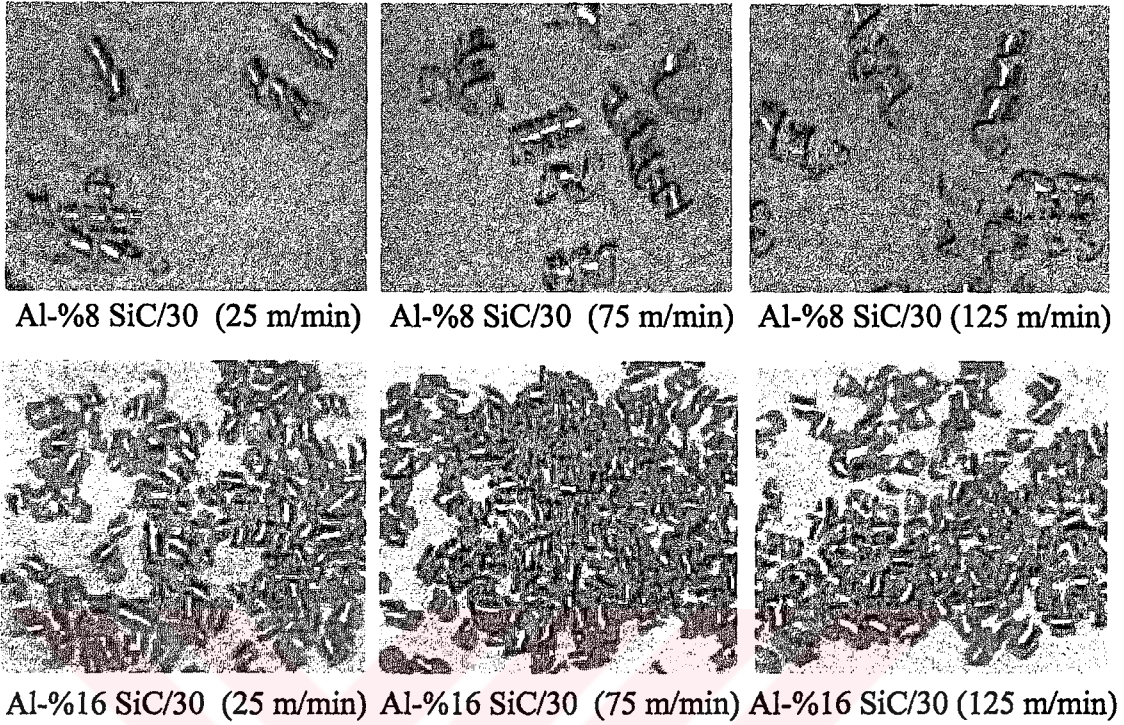
Diğer kesici takımlarda olduğu gibi artan parçacık boyutu ve parçacık oranı ile kesici takım yan yüzey aşınması artmıştır. İşlenen bütün malzemelerde en az aşınma en düşük hız olan 25 m/min'de gerçekleşmiştir. Kesme hızının artmasıyla birlikte, birkaç istisna haricinde, kesici takım aşınması artmıştır. Şekil 5.9'dan görüldüğü gibi Al-%16 SiC/30 MMK malzemenin işlenmesinde 50 m/min kesme hızında 75 m/min kesme hızında gerçekleşenden daha fazla yan yüzey aşınması gerçekleşmiştir. Bu

durumun iş parçasının mikroyapısındaki düzensizliklerden kaynaklandığı düşünülmektedir. MMK malzemelerin yapılarında bu tür düzensizliklerin olması muhtemeldir. Fazla aşınmanın gerçekleştiği bu bölgelerde takviye elemanı parçacık yoğunluğunun daha fazla olduğu tahmin edilmiştir.



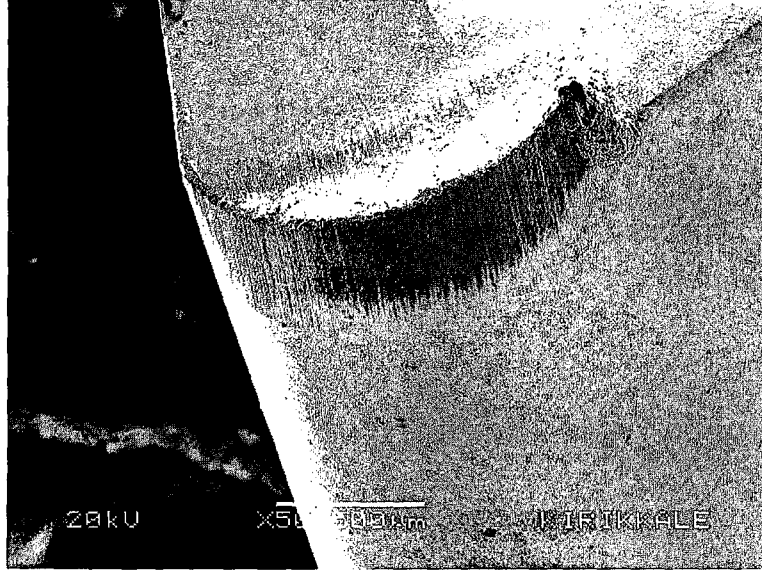
Şekil 5.25. CVD elmas kaplamalı sementit karbür kesici takımlarda oluşan yan yüzey aşınmalar

Deneylerden elde edilen talaşların incelenmesi sonucu, MMK malzeme içerisindeki takviye elemanı oranının talaş kıvrılma yarıçapını etkileyen en önemli unsur olduğu görülmüştür. Ayrıca, kesme hızının da talaşların kıvrılma yarıçaplarını etkilediği görülmüştür. Takviye elemanı oranı arttıkça talaş kıvrılma yarıçapı küçülürken kesme hızının artmasıyla talaş kıvrılma yarıçapı büyümüştür (Şekil 5.26). Artan takviye elemanı oranı ile talaşların kıvrılma yarıçaplarının azalması malzeme içerisindeki takviye elemanı oranının artmasıyla azalan süneklığe ve artan kesme hızıyla kıvrılma yarıçapının artması da artan kesme hızı nedeniyle sıcaklığın artarak malzemenin ısıl olarak yumuşaması ile açıklanabilir.



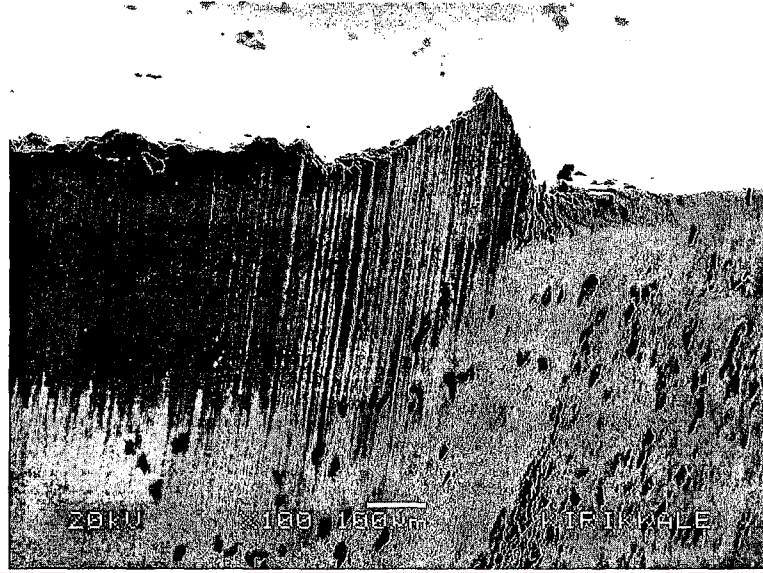
Şekil 5.26. CVD elmas kaplamalı sementit karbür kesici takımlarla işleme esnasında oluşan talaşların parçacık oranı ve kesme hızına bağlı olarak kıvrılma yarıçapları

Kesici takımın aşınan uçlarının SEM ile incelenmesi ile 2500 mm^3 talaş kaldırma sonucunda kaplamanın tamamen aşındığı görülmüştür. Şekil 5.27 Al-%8 SiC/30 MMK malzemenin 25 m/min kesme hızında işlenmesi sonucu kesici uçtaki aşınmayı göstermektedir. Aşınan bölgelere iş parçası malzemesi tamamen sıvandığı için etkin olan aşınma mekanizması açıkça görülememektedir. Ayrıca, bu SEM fotoğrafından kesici ucta yoğun bir şekilde yığıntı talaş görülmektedir.



Şekil 5.27. Al-%8 SiC/30 MMK malzemenin 25 m/min kesme hızında işlenmesi sonucu CVD elmas kaplamalı sementit karbür kesici takımın kesici ucunda kaplamanın tamamen aşınması

Aşınan kesici uçların daha büyük bir büyütme oranı ile çekilen SEM fotoğraflarından kaplamanın tamamen aşınıp gitmesi sonucu iş parçası malzemesinin sıvanarak aşınan bölgeleri tamamen kapladığı görülmüştür. Kaplamanın kesici takımdan ayrılması, kesme işleminin başlaması ile birlikte aşındırıcı parçacıkların kaplama üzerinde oluşturduğu aşınan bölgelere ve kaplamada olması muhtemel olan bir kısım boşluklara iş parçası malzemesinin kuvvetli bir şekilde yapışması ve devam eden kesme işlemi ile yapışan bu malzemelerin kaplamayı kesici takımdan koparmasıyla açıklanabilir (86). Kaplamanın kesici takımdan ayrılmasıyla birlikte sementit karbür alt tabaka SiC parçacıkların abrasif etkisine doğrudan maruz kalacağı için aşınma hızlanır. Şekil 5.28, Al-%8 SiC/45 MMK malzemenin 25 m/min kesme hızında işlenmesi sonucu kesici takımın aşınan bölgesine sıvanan iş parçası malzemesi üzerindeki abrasif izleri göstermektedir. İş parçası malzemesinin aşınan bölgelere yoğun bir şekilde yapışması, aşınmada adhesiv aşınma mekanizmasının da etkin olduğunu gösterir.

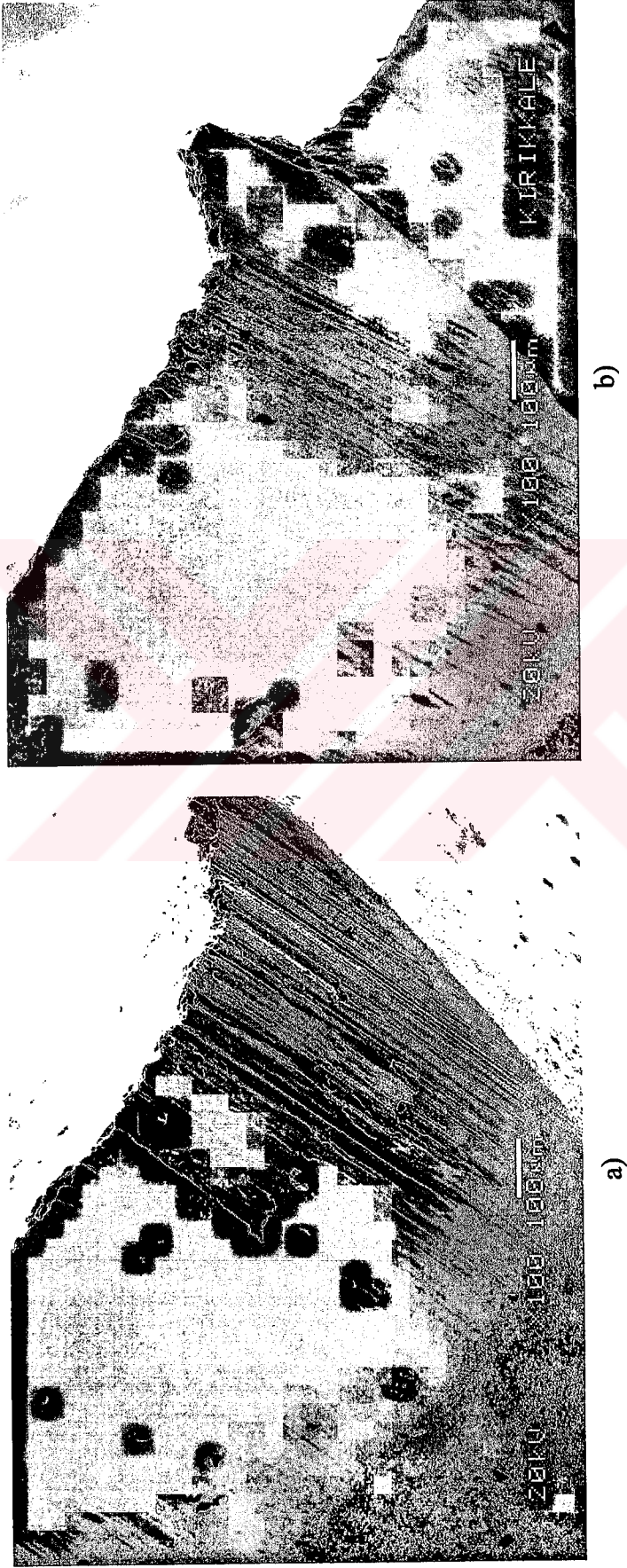


Şekil 5.28. Al-%8 SiC/45 MMK malzemenin 25 m/min kesme hızında işlenmesi sonucu CVD elmas kaplamalı sementit karbür kesici takımındaki yan yüzey aşınması

25 ve 125 m/min kesme hızlarında yapılan deneyler sonucu kesici takımlarda aşınan yan yüzeyler incelendiğinde adhesiv aşınma mekanizmasının, özellikle 25 m/min kesme hızında daha etkin olduğu görülmüştür. 125 m/min kesme hızında oluşan kesici takımın aşınan yüzeylerinin 25 m/min kesme hızında oluşanlardan daha az pürüzlü olduğu görülmüştür. 25 m/min kesme hızında oluşan aşınan yüzeylerde abrasif izler daha belirgindir. Şekil 5.29 a) ve b), Al-%16 SiC/45 MMK malzemenin 25 ve 125 m/min kesme hızlarında işlenmesi sonucunda oluşan kesici takım aşınmalarını göstermektedir. Düşük kesme hızlarında aşınan yüzeylere yapışan iş parçası malzemesinin düşük sıcaklıktan dolayı dayanımı daha yüksek olur. Devam eden kesme sürecinde yapışan iş parçası malzemesi üzerine gelen kuvvetler bunları aşınmış yüzeylere daha fazla sıvamaktan ziyade bu yüzeylerden koparmaya zorlar. Yapışan iş parçası malzemesinin koparak kesici takım malzemesinin de bir kısmını koparmasıyla adhesiv aşınma gerçekleşmiş olur. Yüksek kesme hızların da ise yapışan iş parçası malzemesinin yüksek sıcaklık nedeniyle dayanımının düşük olduğundan dolayı aşınmış yüzeylere daha fazla sıvanması muhtemel olduğu için yüksek hızlarda çoğunlukla SiC parçacıkların abrasif etkisiyle aşınma gerçekleşmiş olur.

SEM fotoğraflarından aşınma bandının alt kısmındaki elmas kaplama üzerinde ise abrasif izler daha az belirgindir. Oldukça yüksek sertliğinden dolayı aşınmaya daha dirençli olduğu için, elmas kaplamanın yan yüzey aşınmasını geciktirici bir etkiye sahip olduğu söylenebilir.



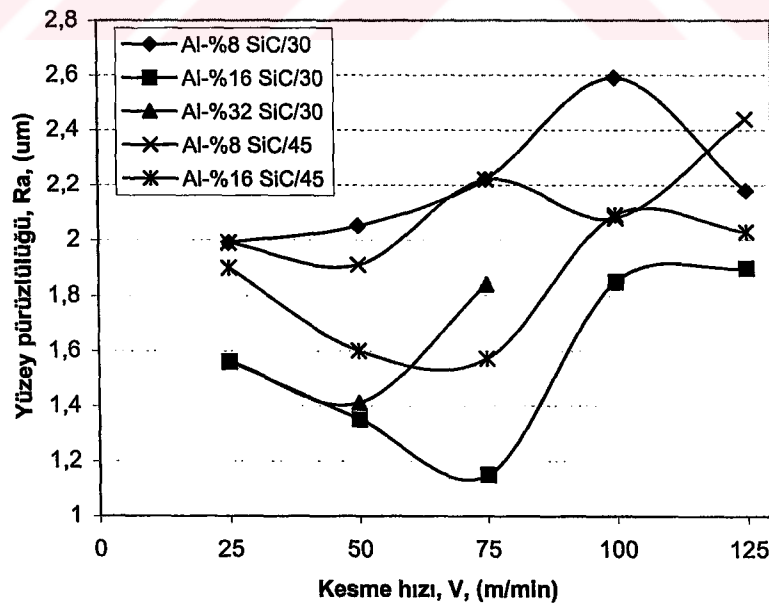


Şekil 5.29. Al-%16 SiC/45 MMK malzemenin CVD elmas kaplamalı sementit karbür kesici takım ile a) 25 ve b) 125 m/min kesme hızlarında işlenmesi sonucu kesici takımda oluşan aşınmalar

5.4.3.2. Yüzey pürüzlülüğü

Yüzey pürüzlülüğü ölçümleri, işlenebilirlik deneylerini müteakip işlenmiş yüzeyler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.30 ölçülen ortalama yüzey pürüzlülük değerlerini (R_a) vermektedir.

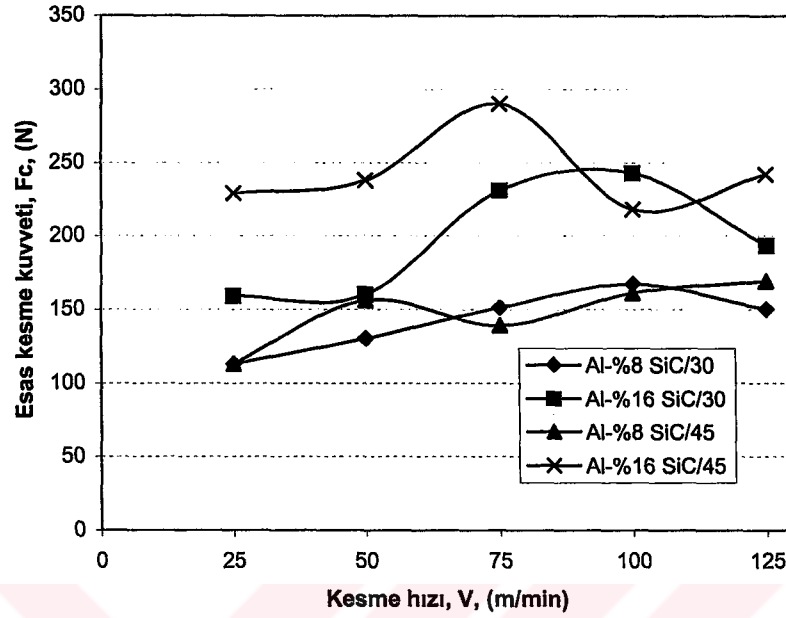
Şekil 5.30'dan görüldüğü gibi kaplamasız ve kaplamalı sementit karbür kesici takımlarda olduğu gibi kesme hızı, parçacık boyutu ve parçacık içeriğine göre yüzey pürüzlülüğünde belirli bir eğilim yakalanamamıştır. Bu durum kullanılan bütün kesici takımlarda hızlı takım aşınması sonucunda kesici bir uçtan ziyade aşınan bir bölgenin sıvama yapma etkisi ile açıklanabilir. Sıvama sonucu işlenen yüzey aşırı bir deformasyona uğrar ve R_a değerinde bir azalma görülür. Ayrıca, SEM fotoğraflarından görüldüğü gibi bütün kesici takımlarda yoğun bir yığıntı talaş oluşumu görülmektedir. Yığıntı talaş yapısı itibariyle dinamik olduğu için, kesme esnasında koparak kesici takımdan ayrıldığı zaman yüzey pürüzlülüğünde değişimler görülür.



Şekil 5.30. CVD elmas kaplamalı sementit karbür kesici takımlarla elde edilen ortalama yüzey pürüzlülük (R_a) değerleri

5.4.3.3. Kesme kuvvetleri

CVD elmas kaplamalı sementit karbür kesici takımlarla yan yüzey aşınması ve yüzey pürüzlülüğü ölçümlerine ek olarak önemli bir işlenebilirlik kriteri olan kesme kuvvetleri de ölçülmüştür. Şekil 5.31, bu kesici takımlar için ölçülen kesme kuvvetlerini göstermektedir. Metal kesme işleminde artan kesme hızı ile birlikte genelde kesme kuvvetlerinin düştüğü bilinen bir gerçektir. Artan kesme hızı ile kesme kuvvetlerindeki düşüş sıcaklık artışı nedeniyle kesici takım talaş yüzeyindeki temas alanının azalması ve kısmen de akma bölgesinde (ikinci deformasyon bölgesi) kayma dayanımının azalması ile açıklanmıştır (66). Looney et al. (82) bu genel eğilimin aksine, parçacık takviyeli MMK malzemelerin sementit karbür kesici takımlarla işlenmesinde kesme kuvvetlerinde bu şekilde bir düşme görülmediğini ve artan kesme hızı ile arttığını rapor etmişlerdir. Bu durum parçacık takviyeli MMK malzemelerin işlenmesinde sementit karbür kesici takımların hızlı aşınmaya maruz kalmaları ile açıklanmıştır. Hızlı aşınma sonucu kesici takımda kesici bir kenardan ziyade bir yüzey kesme işlemi yapar ve dolayısıyla sürtünme kuvvetleri artar. Artan kesme hızıyla kesici takım aşınması arttığı için bu bölgenin alanı da artar ve daha fazla sürtünmeye sebep olarak kesme kuvvetleri artar.



Şekil 5.31. CVD elmas kaplamalı sementit karbür kesici takımlarla işleme esnasında oluşan esas kesme kuvvetleri

Bu çalışmada 5 farklı MMK malzemenin işlenmesinde kesme kuvvetleri ölçülmüştür. Şekil 5.31 esas kesme kuvvetlerinin kesme hızı ve MMK malzemelerin mikroyapısı ile değişimini göstermektedir. Şekilden görüleceği gibi genelde artan kesme hızı ve MMK malzeme içerisindeki artan parçacık boyutu ve parçacık oranı ile kesme kuvvetleri artmıştır. Looney et al.'ın (86) da belirttiği gibi artan kesme hızları ile kesme kuvvetleri genelde artmıştır. Al-%16 SiC/45 MMK malzemenin işlenmesinde gerçekleşen yüksek takım aşınması, Şekil 5.31'den görüldüğü gibi kesme kuvvetlerini de artırmıştır.

5.5. MMK Malzemelerin Mekanik Özellikleri ile İşlenebilirlikleri Arasındaki İlişki

Çizelge 5.1'den görüldüğü gibi üretilen MMK malzemelerin sertlikleri ihtiva ettikleri SiC parçacık oranı ve boyutuna göre değişiklikler göstermektedir. Artan parçacık oranı ve azalan parçacık boyutu ile genellikle sertlik artmıştır. Bununla birlikte, işlenebilirlik deneylerinin sonuçları incelendiğinde ise artan parçacık oranı ve boyutu ile kesici takım aşınmasının arttığı görülmektedir. Parçacık boyutunun artması ile

birlikte sertlik değerlerinde düşüş olurken kesici takım aşınması artmaktadır. Geleneksel metal ve alaşımlarının işlenmesinde sertliğin artması ile genellikle kesici takım aşınması artarken yapılan bu çalışmadan görüldüğü gibi büyük boyutlu parçacıklarla takviyeli MMK malzemelerin sertlikleri daha küçük boyutlu parçacıklarla takviyeli MMK malzemelerin sertliklerinden düşük olmasına rağmen daha fazla kesici takım aşınmasına neden olmaktadır. Bu nedenle, MMK malzemelerde kesici takım aşınmasında malzeme içerisindeki takviye elemanı parçacıklarının boyutunun malzeme sertliğinden daha fazla bir etkiye sahip olduğu görülmüştür.

Benzer şekilde, geleneksel metal ve alaşımlarının işlenmesinde malzemenin çekme dayanımının artması ile çoğunlukla işlenebilirlik kötüleşir ve bunun sonucu olarak da kesici takım aşınması artar. Örneğin, küresel grafitli dökme demirin çekme dayanımı gri dökme demirin çekme dayanımından yüksektir ve dolayısıyla işlenebilirliği takım ömrü kriterine göre daha kötüdür. Bu durum, iş parçasının artan akma dayanımı nedeniyle kayma düzleminde deformasyonun zorlaşması ve kesici takım ucunun maruz kaldığı gerilmelerin artmasıyla açıklanır. Ancak, bu çalışmada MMK malzemenin ihtiva ettiği parçacık içeriğinin artmasıyla çekme dayanımında azalma olmuş (Şekil 5.5) fakat bu durum geleneksel metal alaşımlarında olduğu gibi kesici takım aşınmasının azalmasına neden olmamıştır. Bu durum, kesici takım aşınmasında malzemenin çekme dayanımından ziyade ihtiva ettiği sert parçacıkların oranı ve boyutu ile açıklanmıştır.

5.6. Genel Değerlendirme

Endüstriyel olarak kullanımlarının gün geçtikçe arttığı belirtilen parçacık takviyeli MMK malzemeler için uygun kesici takım ve kesme parametrelerinin belirlenmesi oldukça önemlidir. Çeşitli boyutlarda ve oranlarda SiC parçacıklar içeren 2014-Al alaşımı MMK malzemeler üzerinde dört farklı kesici takım kullanılarak işlenebilirlik deneyleri yapılmıştır.

Yapılan bütün deneylerde kaplamasız sementit karbür (Hti10) kesici takımlar kaplamalı sementit karbür (UC5005) kesici takımlardan daha hızlı takım aşınmasına maruz kalmıştır. Artan kesme hızı, SiC parçacık boyutu ve SiC parçacıkların MMK malzeme içindeki oranı ile takım aşınması artmıştır. Dolayısıyla en düşük takım aşınması kaplamalı sementit karbür kesici takımında 20 m/min kesme hızında Al-%8 SiC/30 MMK malzemenin işlenmesinde gerçekleşmiştir. Kaplamasız sementit karbür kesici takım ise yapılan bütün deneylerde daha fazla aşınmaya maruz kalmıştır. Örneğin, Al-%8 SiC/30 MMK malzemeden kaplamasız sementit karbür kesici takımla 20 m/min kesme hızında 5000 mm³ talaş kaldırılması sonucu 0,52 mm yan yüzey aşınması gerçekleşirken aynı malzemenin kaplamalı sementit karbür kesici takımla işlenmesi sonucunda ise 6250 mm³ talaş kaldırılması sonucu 0,50 mm yan yüzey aşınması gerçekleşmiştir. Yüksek oranlarda ve boyutlarda SiC parçacıklar içeren MMK malzemelerin işlenmesinde ise çok hızlı takım aşınması gerçekleşmiştir. % 32 oranında 30 µm ve 45 µm boyutlu SiC parçacıklar içeren MMK malzemelerin işlenmesinde 1250 mm³ talaş kaldırma sonucunda sırasıyla 0,50 ve 0,53 mm yan yüzey aşınması gerçekleşmiştir. 110 µm boyutlu SiC parçacıklardan %8 oranında içeren MMK malzemenin işlenmesinde ise takım aşınması oldukça yüksek olduğu için aynı boyutlu parçacıklardan % 16 ve 32 oranında içeren MMK malzemeler deneye tabi tutulmamıştır.

SiC parçacık takviyeli MMK malzemelerin işlenmesinde takım aşınmasının parçacık boyutu, parçacık içeriği ve kesme hızındaki artışla önemli derecede arttığı görülmüştür. MMK malzemelerin sementit karbür kesici takımlarla işlenebilirliğini inceleyen çalışmalarda sabit bir miktarda talaş kaldırma sonucunda ilerleme hızının artmasıyla takım ömrünün arttığı rapor edilmiştir. Dolayısıyla, bu çalışmada elde edilen talaş kaldırma oranları endüstriyel olarak kullanım esnasında ilerleme hızının artmasıyla artırılabilir. Sementit karbür kesici takımlar bu malzemelerin kaba işlenmesinde kullanıldığı için, artan ilerleme hızıyla artan yüzey pürüzlülüğü de bir problem olmaz.

CBN kesici takımlarla işlenebilirlik deneyleri 30, 45 ve 110 μm parçacıklardan % 16 oranında içeren üç farklı MMK malzeme üzerinde yapılmıştır. Al-%16 SiC/110 MMK malzemenin işlenmesinde kesici uçlardaki kırılmalar sonucu çok yüksek takım aşınması gerçekleştiği için (yaklaşık 0,45 mm) büyük boyutlarda SiC parçacıklar içeren MMK malzemelerin CBN kesici takımlarla işlenmesinin uygun olmadığı görülmüştür. Al-%16 SiC/30 ve Al-%16 SiC/45 MMK malzemelerin işlenmesinde ise kaplamasız ve kaplamalı sementit karbür kesici takımlara göre CBN kesici takımlarda oldukça düşük yan yüzey aşınması gerçekleşmiştir. Bu malzemelerin işlenmesinde deneyler 100, 150 ve 200 m/min kesme hızlarında yapılmış ve her iki malzeme için de en düşük takım aşınması 150 m/min kesme hızında gerçekleşmiştir. Örneğin, Al-%16 SiC/45 MMK malzemedan 20 m/min kesme hızında kaplamalı sementit karbür kesici takımla 2500 mm³ talaş kaldırılması sonucu 0,52 mm yan yüzey aşınması gerçekleşirken aynı malzemedan 150 m/min kesme hızında CBN kesici takımla aynı miktarda talaş kaldırılması sonucu ise yalnızca 0,06 mm aşınma gerçekleşmiştir. CBN kesici takım oldukça yüksek sertliği nedeniyle bu malzemenin işlenmesinde kaplamalı sementit karbür kesici takımlara göre yaklaşık olarak 9 kat daha fazla aşınmaya direnç göstermiştir. Bu oran MMK malzeme içerisindeki SiC parçacık boyutunun azalmasıyla daha da artmıştır.

Yapılan çalışmaların çoğunda sementit karbür ve PCD kesici takımlarla MMK malzemelerin işlenmesinde genellikle artan kesme hızıyla takım aşınmasının arttığı belirtilmiştir. Yapılan bu çalışmada ise, düşük kesme hızlarında iş parçası malzemesinin kesici takıma yapışması ve kopması sonucu CBN kesici takımlarda adhesiv aşınma mekanizması nedeniyle daha fazla kesici takım aşınması gerçekleşmiştir.

CVD elmas kaplamalı sementit karbür kesici takımlarla yapılan deneylerde kaplamanın kesici uça tamamen aşındığı görülmüştür. Özellikle düşük kesme hızlarında aşınma dirençleri kaplamalı sementit karbür (UC5005) kesici takımın aşınma direncine benzer olmuştur. Örneğin, Al-%8 SiC/30 MMK malzemedan 20 m/min kesme hızında kaplamalı sementit karbür kesici takımla 2500 mm³ talaş kaldırılması sonucu 0,34 mm yan yüzey aşınması gerçekleşirken aynı malzemedan

25 m/min kesme hızında CVD elmas kaplamalı kesici takımla aynı miktarda talaş kaldırılması sonucu da 0,34 mm yan yüzey aşınması gerçekleşmiştir. CVD elmas kaplamalı kesici takımlar genelde yüksek kesme hızlarında kaplamalı sementit karbür kesici takımlara göre daha iyi performans göstermişlerdir. Her iki kesici takımın SEM fotoğrafları incelendiğinde kaplamalı sementit karbür kesici takımların yüksek kesme hızlarında kesici uçta kırılmalar olurken CVD elmas kaplamalı sementit karbür kesici takımlarda ise bu tür kırılmalar görülmemiştir ve bunun yerine yoğun bir yığıntı talaş eğilimi görülmüştür.



6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Sıvı metal karıştırma-basınçlı döküm metoduyla Al 2014 alaşımına çeşitli boyutlarda ve oranlarda SiC parçacıklar ilave edilerek SiC parçacık boyutu ve oranına göre dokuz farklı MMK malzeme üretilmiştir. Üretilen MMK malzemelerin mikroyapı özellikleri incelenerek sertliklerinin ve çekme dayanımlarının belirlenmesi için deneyler yapılmıştır. Farklı kesici takımlar kullanılarak tornalama yöntemiyle üretilen bu malzemelerin işlenebilirlikleri incelenmiştir. Yapılan bu çalışmalardan aşağıdaki sonuçlar çıkarılmıştır:

1. Sıvı metal karıştırma-basınçlı döküm metoduyla farklı boyutlardaki SiC parçacıklar 2014-Al alaşımına çeşitli oranlarda başarılı bir şekilde ilave edilmiştir. Mikroyapı incelemelerinden SiC parçacık dağılımının homojen olduğu ve parçacık ile matris arasında iyi bir bağın olduğu görülmüştür. Çekme deneyine tabi tutulan numunelerin kırılma yüzeylerinin SEM ile incelenmesi sonucu kırılmanın genel olarak sünek biçimde olduğu tespit edilmiştir.
2. SiC parçacık büyüklüğü, MMK malzeme içindeki oranı ve kesme hızı kullanılan bütün kesici takımlarda aşınmayı etkileyen en önemli faktörler olarak bulunmuştur. Artan parçacık boyutu ve parçacık içeriği ile kesici takım aşınması artmıştır. Kübik bor nitrit (CBN) kesici takımlar haricinde, artan kesme hızıyla da kesici takım aşınması artmıştır. En büyük parçacık olan 110 μm parçacıklardan ağırlıkça % 8 oranında ihtiva eden MMK malzemenin işlenmesinde daha küçük boyutlu parçacıklar içeren MMK malzemelerin işlenmesinde oluşan kesici takım aşınmalarına göre daha hızlı takım aşınması gerçekleştiği için % 16 ve 32 oranında 110 μm parçacıklar içeren MMK malzemelerin kaplamalı ve kaplamasız kesici takımlarla işlenmesine gerek görülmemiştir.
3. Kaplamalı sementit karbür kesici takımlar kaplamasız sementit karbür kesici takımlardan daha az takım aşınmasına maruz kalmışlardır. Kaplamalı kesici takımda kaplama hızlı bir şekilde aşınmakla birlikte aşınmayı geciktirmede bir

miktar katkı sağlamıştır. Ayrıca, kaplamalı kesici takımın daha iyi aşınma direnci sergilemesi bu kesici takımda daha kararlı koruyucu yığıntı talaş oluşumuna atfedilmiştir.

4. Kaplamasız sementit karbür kesici takımlarla elde edilen iş parçası yüzey kaliteleri R_a değerine göre çoğunlukla düşük kesme hızlarında daha iyi olmuştur. Bununla birlikte, MMK malzeme içindeki SiC parçacık büyüklüğü, oranı ve kesme hızına göre yüzey pürüzlülüğünde belirli bir eğilim elde edilememiştir. Bu durum, hızlı takım aşınması nedeniyle kesici takımın iş parçası yüzeyinde kesmeden ziyade sıvama yapmasıyla açıklanmıştır.
5. Kaplamasız ve kaplamalı sementit karbür kesici takımlarda etkin aşınma mekanizmaları düşük kesme hızlarında iki gövdeli ve üç gövdeli abrasif aşınma ve yüksek kesme hızlarında da kesici uçta kırılmalar şeklinde olmuştur. CBN kesici takımlarda ise 110 μm SiC parçacıkla takviyeli MMK malzemenin işlenmesinde kırılmalar ve küçük boyutlardaki SiC parçacıklarla takviyeli MMK malzemelerin düşük kesme hızlarında işlenmesinde adhesiv aşınma mekanizmasının etkin olduğu ve yüksek kesme hızlarında ise abrasif ve adhesiv aşınma mekanizmalarının her ikisinin de etkin olduğu görülmüştür. CVD elmas kaplamalı sementit karbür kesici takımlarda bütün kesme hızlarında abrasif aşınma ve düşük kesme hızlarında da abrasif ve adhesiv aşınma mekanizmalarının her ikisinin de etkin olduğu görülmüştür.
6. Kullanılan kesici takımlardan en iyi aşınma direncini CBN sergilemekle birlikte en büyük boyutlu takviye elemanı olan 110 μm SiC parçacıkla takviyeli MMK malzemenin işlenmesinde kesici uçta kırılmalar nedeniyle oldukça fazla yan yüzey aşınmasına maruz kalmıştır. En düşük aşınma direncini ise kaplamasız sementit karbür sergilemiştir. CVD elmas kaplamalı sementit karbür kesici takım ise oldukça sert olan elmas kaplamaya rağmen kaplamalı ve kaplamasız sementit karbür kesici takımlara göre önemli derecede aşınma direnci sergileyememiştir.

Bu durum CVD elmas kaplamanın hızlı bir şekilde aşınıp fazla bir koruyucu etki oluşturamamasına atfedilmiştir.

7. CVD elmas kaplamalı sementit karbür kesici takımlarda artan kesme hızıyla kesme kuvvetleri artmıştır ve bu durum artan kesme hızıyla yan yüzey aşınmasının artışı ile açıklanmıştır.

Daha sonra yapılacak çalışmalar için öneriler:

1. Ergimiş alüminyum alaşımına katı SiC parçacıkların ilavesi karışımın akıcılığını azaltmıştır. Bu nedenle, başarılı bir şekilde döküm işlemini gerçekleştirmek için basınç uygulamak gerekmektedir.
2. Parçacık boyutunun artmasıyla işlenebilirlik olumsuz yönde etkilenmektedir. Parçacık takviyeli MMK malzemelerin özellikle aşınma dirençleri iyi olduğu için parçacık boyutu ve oranının aşınmaya direncine etkilerini inceleyen çalışmalar yapılarak kullanılacak malzemeler aşınma dirençlerine göre belirlenmeli ve mümkün olduğu durumlarda büyük boyutlu parçacıklar içeren MMK malzemelerin kullanılmasından kaçınılmalıdır.
3. CBN kesici takımın kesici ucundaki pah yığıntı talaş oluşumuna ve dolayısıyla adhesiv aşınmaya katkıda bulunduğu için kesici uçta kırılmalar artmaktadır. Özellikle küçük boyutlu parçacıklarla takviyeli MMK malzemelerin işlenmesinde daha keskin bir kesici uç yığıntı talaş oluşumunu azaltacağı için takım aşınmasının azaltılmasında önemli bir etki yapabilir.
4. MMK malzemelerin işlenmesinde kesici takım aşınmasının esas nedeni sert seramik parçacıklar olmakla birlikte matris malzemesinin dayanımı da kesici takım aşınmasını etkilemektedir. Bu nedenle, MMK malzemelere bir takım işlemler uygulayarak, uygulanan ısı işlemlerin işlenebilirliğe etkileri araştırılabilir.

5. İşleme esnasında MMK malzeme içerisindeki sert seramik parçacıkların bir kısmı çeşitli nedenlerle açığa çıktığı için kullanılan takım tezgahlarının kızaklarında çizilme ve aşınmalara neden olabilir. Bu durumu engellemek için önlemler alınmalıdır.
6. MMK malzemelerin işlenmesinde sementit karbür kesici takımlar hızlı aşınmaya maruz kaldığı için işlenen iş parçası boyutlarında istenilen ölçü tamlığı elde edilememektedir. Bu nedenle sementit karbür kesici takımlar çoğunlukla MMK malzemelerin kaba işlenmesinde tavsiye edilmektedir. Bitirme işlemi için ise aşınmaya dirençli CBN ve PCD kesici takımlar tavsiye edilmektedir. Yapılan çalışmalardan özellikle PCD kesici takımlarla elde edilen iş parçası ortalama yüzey pürüzlülük değerlerinin (R_a) yüksek olduğu görülmüştür. Bu durum R_a değerine göre daha kaliteli bir yüzey gerektiğinde taşlama gibi alternatif işleme metotlarına ihtiyacı gerektirmektedir. Bu nedenle, MMK malzemelerin taşlanmasıyla ilgili çalışmalara ihtiyaç vardır.

KAYNAKLAR

- 1- İnem, B. "The development of the structures and properties of magnesium matrix silicon carbide reinforced composites", PhD thesis, *School of Materials, University of Leeds, England*, Leeds, 1-4 (1993).
- 2- Jawaid, A., Barnes, S. and Ghadimzadeh, S.R., "Drilling of particulate aluminium silicon carbide metal matrix composites", *Proceedings of the Machining of Composite Materials Symposium*, ASM Materials Week, Chicago, Illinois, 35-47, (1992).
- 3- Ibrahim, I.A., Mohamed, F.A. and Lavernia, E.J., "Particulate reinforced metal matrix composites – a review", *Journal of Materials Science*, 26: 1137-1156 (1991)
- 4- Luliano, L., Settineri, L. and Gatto, A., "High-speed turning experiments on metal matrix composites", *Composites, Part A*, 29A: 1501-1509 (1998)
- 5- Coelho, R.T., Yamada, S., le Roux, T., Aspinwall, D.K., and Wise, M.L.H., "Conventional machining of an aluminium based SiC reinforced metal matrix composite (MMC) alloy", *Proceedings 30th MATADOR*, 125-133 (1993).
- 6- McNelley, T.R. and Kalu. P.N., "The effect of thermomechanical processing on the ambient temperature properties and response of a 6061 Al-Al₂O₃ composite", *Scripta Metallurgica et Materialia*, 25: 1041-1046 (1991)
- 7- Clyne, T.W. and Withers, P.J., An introduction to metal matrix composites, *Cambridge University Press*, Cambridge, UK, 1-400, (1993)
- 8- Lloyd, D.J., "Solidification microstructures of particulate reinforced Al/SiC composites", *Composites Science and Technology*, 35: 159-179 (1989)
- 9- Lee, H.F., Boey, F., Khor, K.A., Tan, M.J., Gan, J. ve Loh, N.L., "The production of aluminium alloy composites using a cold isotatic press and extrusion approach", *Journal of Materials Processing Technology*, 29: 245-253 (1992)
- 10- Sukumaran, K., Pillai, S.G.K., Pillai, R.M. Kelukutty, V.S., Pai, B.C., Satyanarayana, K.G. and Ravikumar, K.K., "The effects of magnesium additions on the structure and properties of Al-7 Si-10 SiCp composites", *Journal of Materials Science*, 30: 1469-1472 (1995)
- 11- Singh, J., Goel, S.K., Mathur, V.N.S. and Kapoor, M.L., "Elevated temperature tensile properties of squeeze-cast Al-Al₂O₃-MgO particulate MMCs up to 573 K", *Journal of Material Science*, 26: 2750-2758 (1991)

- 12- Coelho, R.T., Yamada, S., Aspinwall, D.K., and Wise, M.L.H., "The application of polycrystalline diamond (PCD) tool materials when drilling and reaming aluminium based alloys including MMC" *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 35(5): 761-774 (1995)
- 13- Sur, G., "Alüminyum esaslı kompozitlerin üretimi ve işlenebilirliğinin incelenmesi" Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 53-56 (2002)
- 14- Groover, M.P., "Fundamentals of modern manufacturing – Materials, processes and systems", *Prentice-Hall Inc.*, New Jersey 220-639 (1996)
- 15- DeGarmo, E.P., Black, J.T. and Kohser, R.A., "Materials and processes in manufacturing", *Prentice-Hall Inc.*, New Jersey, 214-652 (1997)
- 16- Surappa, M.K., "Microstructure evolution during solidification of DRMMCs (Discontinuously reinforced metal matrix composites): State of art", *Journal of Materials Processing Technology*, 63: 325-333 (1997)
- 17- Ghomashchi, M.R. ve Vikhrov, A., "Squeeze casting: an overview", *Journal of Materials Processing Technology*, 101: 1-9 (2000)
- 18- Lindroos, V.K. and Talvite, M.J., "Recent advances in metal matrix composites", *Journal of Materials Processing Technology*, 53: 273-284 (1995)
- 19- Huda, D., El Baradie, M.A. and Hashmi, M.S.J., "Metal matrix composites: Materials aspects. Part II", *Journal of Materials Processing Technology*, 37: 529-541 (1993)
- 20- Abdel-Azim, A.N., Shash, Y., Mostafa, S.F. and Younan, A., "Casting of 2024-Al alloy reinforced with Al₂O₃ particles", *Journal of Materials Processing Technology*, 55: 199-205 (1995)
- 21- Zheng, M., Wu, K., Yao, C., Sato, T., Tezuka, H., Kamio, A. and Li, D.X., "Interfacial bond between SiCw and Mg in squeeze cast SiCw/Mg composites", *Materials Letters*, 41: 57-62 (1999)
- 22- Candan, E., "Effect of alloying elements to aluminium on the wettability of Al/SiC system", *Turkish Journal of Engineering and Environmental Science*, 26: 1-5 (2002)
- 23- Pai, B.C., Ramani, G., Pillai, R.M. and Satyanarayana, K.G., "Review - Role of magnesium in cast aluminium alloy matrix composites", *Journal of Materials Science*, 30: 1903-1911 (1995)

- 24- Hashim, J., Looney, L. and Hashmi, M.S.J., "Metal matrix composites: production by stir casting method", *Journal of Materials Processing Technology*, 92-93: 1-7 (1999)
- 25- Taheri-Nassaj, E., Kobashi, M. and Choh, T., "Fabrication of an AlN particulate aluminium matrix composite by a melt stirring method", *Scripta Metallurgica et Materialia*, 32: 1923-1929 (1995)
- 26- Yılmaz, M. ve Altıntaş, S., "Parçacık SiC takviyeli alüminyum esaslı kompozitlerin mikroyapı ve aşınma özellikleri", 7. *Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi*, Ankara, 2: 1175-1182 (1993).
- 27- Tjong, S.C. and Chen, F., "Wear behaviour of as-cast ZnAl27/SiC particulate metal matrix composites under lubricated sliding condition", *Metallurgical and Materials Transactions A*, 28A: 1951-1955 (1997)
- 28- Akbulut, H., "Alümina fiber takviyeli Al-Si metal matrisli kompozitlerin üretimi ve mikroyapı özellik ilişkilerinin incelenmesi", Doktora Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 22-23 (1994)
- 29- Varma, S.K., Ponce, J., Solis, M., Andrews, S. and Salas, D., "The control of grain size and distribution of particles in a (6061 Alloy)m/(Al₂O₃)p composite by solutionizing treatment", *Metallurgical and Materials Transactions A*, 27A: 2023-2034 (1996)
- 30- Everett, R.K. and Higby, P.L., "Expansivity of diboride-particulate/alumium composites", *Scripta Metallurgica et Materialia*, 25: 625-630 (1991)
- 31- Li. H.X., Lo, J. and Xiao, X.R., "Strengthening of Al₂O₃/6061Al particulate composite at liquid nitrogen temperature", *Scripta Metallurgica et Materialia*, 33: 1423-1429 (1995)
- 32- Lee, H.S., Yeo, J.S., Hong, S.H., Yoon, D.K. and Na, K. H., "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)
- 33- Kalpakjian, S., "Manufacturing process for engineering materials", *Addison-Wesley*, New York, 120-121 (1991)
- 34- Gül, F., "Seramik parçacık takviyeli kompozitlerin üretim yöntemleri ve özellikleri", *M.Ü. Fen Bilimleri Dergisi*, 15: 101-114 (1999)
- 35- Seo, Y.H. and Kang, C.G., "The effect of applied pressure on particle-dispersion characteristics and mechanical properties in melt-stirring squeeze-cast SiCp/Al composites", *Journal of Materials Processing Technology*, 55: 370-379 (1995)

- 36- Zhou, W. and Xu, Z.M., "Casting of SiC reinforced metal matrix composites", *Journal of Materials Processing Technology*, 63: 358-363 (1997)
- 37- Samuel, A.M., Liu, H. and Samuel, F.H., "On the castability of Al-Si/SiC particle-reinforced metal matrix composites: factors affecting fluidity and soundness", *Composites Science and Technology*, 49: 1-12 (1993)
- 38- Taha, M.A. and El-Mahallawy, N.A., "Metal-matrix composites fabricated by pressure-assisted infiltration of loose ceramic powder", *Journal of Materials Processing Technology*, 73: 139-146 (1998)
- 39- Ralph, B., Yuen, H.C. and Lee, B., "The processing of metal matrix composites - an overview", *Journal of Materials Processing Technology*, 63: 339-353 (1997)
- 40- 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)
- 41- Lim, C.S. and Clegg, A.J., "The production and evaluation of metal-matrix composite casting produced by a pressure-assisted investment casting process", *Journal of Materials Processing Technology*, 67: 13-18 (1997)
- 42- Liu, J., Wang, S., Shi, Z. And 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)
- 43- Maity, P.C., Panigrahi, S.C., and Chakraborty, P.N., "Mechanical properties of hot worked Al-5CuO particle composite", *Journal of Materials Processing Technology*, 94: 179-182 (1999)
- 44- Maity, P.C., Panigrahi, S.C. and Chakraborty, P.N., "Preparation of aluminium-alumina in-situ particle composite by addition of titania to aluminium melt", *Scripta Metallurgica et Materialia*, 28: 549-552 (1993)
- 45- Maity, P.C., Chakraborty, P.N. and Panigrahi, S.C., "Al-Al₂O₃ in-situ particle composites by reaction of CuO particles in molten pure Al", *Materials Letters*, 30: 147-151 (1997)
- 46- Shi, Z., Gu, M., Wu, R. and Liu, J., "Structure control of in-situ silicon particle reinforced Zn-27Al composite materials", *Journal of Materials Processing Technology*, 63: 417-420 (1997)
- 47- Nakata, H., Choh, T. and Kanetake, N., "Fabrication and mechanical properties of in situ formed carbide particulate reinforced aluminium composite", *Journal of Materials Science*, 30: 1719-1727 (1995)

- 48- Arsenault, R. J. and Wu, S.B., "A comparison of PM vs. Melted SiC/Al composites", *Scripta Metallurgica et Materialia*, 22: 767-772 (1998)
- 49- Huda, D., Baradie, M.A. and Hashmi, M.S.J., "Metal matrix composites: Manufacturing aspects. Part I", *Journal of Materials Processing Technology*, 37: 513-528 (1993)
- 50- Hong, S.H. ve Chung, K.H., "The effects of processing parameters on mechanical properties of SiC_w/2124Al composites", *Journal of Materials Processing Technology*, 48: 349-355 (1995)
- 51- Hanada, K., Murakoshi, Y., Negishi, H. and Sano, T., "Microstructures and mechanical properties of Al-Li/SiCp composite produced by extrusion processing", *Journal of Materials Processing Technology*, 63: 405-410 (1997)
- 52- Liu, Y.B., Kwok, J.K.M., Lim, S.C., Lu, L. and Lai, M.A., "Fabrication of Al-4.5Cu/15SiCp composites: I. Processing using mechanical alloying", *Journal of Materials Processing Technology*, 37: 441-451 (1993)
- 53- Lu, L., Kwok, J.K.M., Lai, M.O., Liu, Y.B. and Lim, S.C., "Fabrication of Al-4.5Cu/15SiC composite: II. Effects of the processing parameters on fracture properties", *Journal of Materials Processing Technology*, 37: 453-462 (1993)
- 54- Surappa M.K. and Rohatgi, P.K., "Preparation and properties of aluminium-ceramic particle composites", *Journal of Materials Science*, 16: 983-993 (1981)
- 55- Li, Q.F., Loh, N.L. and Hung, N.P., "Casting and HIPing of Al-based metal matrix composites (MMCs)", *Journal of Materials Processing Technology*, 48: 373-378 (1995)
- 56- Sato, A. and Mehrabian, R., "Aluminium matrix composites: Fabrication and properties", *Metallurgical Transactions B*, 7B: 443-451 (1976)
- 57- Cole, G.S., and Sherman, A.M., "Lightweight materials for automotive applications", *Materials Characterisation*, 35: 3-9 (1995)
- 58- Kamat, S.V., Hirth, J.P. and Mehrabian R., "Mechanical properties of particulate-reinforced aluminium-matrix composites ", *Acta Metallurgica.*, 37 (9): 2395-2402 (1989)
- 59- Rizkalla, H.L. and Abdulwahed, A., "Some mechanical properties of metal-nonmetal Al-SiO₂ particulate composites", *Journal of Materials Processing Technology*, 56: 398-403 (1996)
- 60- Kuruvilla, A.K., Prasad, K.S., Bhanuprasad, V.V. and Mahajan, Y.R., "Microstructure-property correlation in Al/TiB₂ (XD) composites", *Scripta Metallurgica et Materialia*, 24: 873-878 (1990)

- 61-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)
- 62-Shaw, M.C., "Metal cutting principles", *Oxford University Press*, Oxford, 1-9 (1989)
- 63-Sandvik Coromant, "Modern metal cutting – A practical handbook", English Edition, *Sandvik Coromant*, Sweden, I-III (1994)
- 64-Davim, J.P. ve 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)
- 65-Kopaci, J. and 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*, 92-92: 381-387 (1999)
- 66-Trent, E.M., "Metal cutting", *Butterworths Press*, London, 1-171 (1989)
- 67-Zhang, J.H., "Theory and technique of precision cutting", *Pergamon Press*, Oxford, 1-50 (1991)
- 68-Şeker, U., Kurt, A. and Çiftçi, İ., "Design and construction of a dynamometer for measurement of cutting forces during machining with linear motion", *Materials and Design*, 23: 355-360 (2002)
- 69-Amstead, B.H., Ostwald, P.F. and Begeman, M.L., "Manufacturing processes", Eighth Edition, *John Wiley & Sons*, New York, 457 (1987)
- 70-Davim, J.P., "Study of drilling metal-matrix composites based on the Taguchi techniques", *Journal of Materials Processing Technology*, 132: 250-254 (2003)
- 71-Davim, J.P., "Design of optimisation of cutting parameters for turning metal matrix composites based on the orthogonal array", *Journal of Materials Processing Technology*, 132: 340-344 (2003)
- 72-Davim, J.P. and Antonio, C.A.C., "Optimisation of cutting conditions in machining of aluminium matrix composites using a numerical and experimental model", *Journal of Materials Processing Technology*, 112: 78-82 (2001)
- 73-Manna, A. and Bhattacharyy, B., "A study on different tooling systems during machining of Al/SiC-MMC", *Journal of Materials Processing Technology*, 123: 476-482 (2002)

- 74- Muller, F. and Monaghan, J., "Non-conventional machining of particle reinforced metal matrix composite", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 40 (9): 1351-1366 (2000)
- 75- Tomac, N. ve Tonnessen, K., "Machinability of particulate aluminium matrix composites", *Annals of the CIRP*, 41 (1): 55-58 (1992)
- 76- Cröjanger, L. ve Meister, D., "Machining of fibre and particle-reinforced aluminium", *Annals of the CIRP*, 41 (1): 63-66 (1992)
- 77- Brun, M.K., Lee, M. ve Gorsler, F. "Wear characteristics of various hard materials for machining SiC-reinforced aluminum alloy", *Wear*, 104: 21-29 (1985)
- 78- Weinert, K. ve König, W., "A consideration of tool wear mechanism when machining metal matrix composites (MMC)", *Annals of the CIRP*, 42 (1): 95-98 (1993)
- 79- Chambers, A.R. ve Stephens, S.E., "Machining of Al-5Mg reinforced with 5 vol. % Saffil and 15 vol. % SiC", *Materials Science and Engineering A*, 135: 287-290 (1991)
- 80- Chambers, A.R., "The machinability of light alloy MMCs", *Composites, Part A*, 27A:143-147 (1996)
- 81- Hung, N.P., Boey, F.Y.C., Khor, K.A., Phua, Y.S. ve Lee, H.F., "Machinability of aluminium alloys reinforced with silicon carbide particulates", *Journal of Materials Processing Technology*, 56: 966-977 (1996)
- 82- Looney, L.A., Monaghan, J.M., O'Reilly, P. ve Taplin, D.M.R., "The turning of an Al/SiC metal-matrix composite", *Journal of Materials Processing Technology*, 33: 453-468 (1992)
- 83- Quigley, O., Monaghan, J. ve O'Reilly, P., "Factors affecting the machinability of an Al/SiC metal-matrix composite", *Journal of Materials Processing Technology*, 43: 21-36 (1994)
- 84- Yanming, Q. ve Zehua, Z., "Tool wear and its mechanism for cutting SiC particle-reinforced aluminium matrix composites", *Journal of Materials Processing Technology*, 100: 194-199 (2000)
- 85- Li, X. and Seah, W.K.H., "Tool wear acceleration in relation to workpiece reinforcement percentage in cutting of metal matrix composites", *Wear*, 247: 161-171 (2001)

- 86- Andrewes, C.J.E., Feng, H.Y. ve Lau, W.M., "Machining of an aluminum/SiC composite using diamond inserts", *Journal of Materials Processing Technology*, 102: 25-29 (2000)
- 87- El-Gallab, M. ve Sklad, M., "Machining of Al/SiC particulate metal-matrix composites, Part I: Tool performance", *Journal of Materials Processing Technology*, 83: 151-158 (1998)
- 88- Conceicao Antonio, C.A. and Paulo Davim, J., "Optimal cutting conditions in turning of particulate metal matrix composites based on experiment and a genetic search model", *Composites: Part A*, 33: 213-219 (2002)
- 89- Lin, J.T., Bhattacharyya, D. and Lane, C., "Machinability of silicon carbide reinforced aluminium metal matrix composite", *Wear*, 181-183: 883-888 (1995)
- 90- Hooper, R.M., Henshall, J.L. and Klopfer, A., "The wear of polycrystalline diamond tools used in the cutting of metal matrix composites", *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials*, 17: 103-109 (1999)
- 91- Paulo Davim, J., "Diamond tool performance in machining metal-matrix composites", *Journal of Materials Processing Technology*, 128: 100-105 (2002)
- 92- El-Gallab, M. ve Sklad, M., "Machining of Al/SiC particulate metal-matrix composites, Part III: Comprehensive tool wear models", *Journal of Materials Processing Technology*, 101: 10-20 (2000)
- 93- Akbulut, H., Durman, M. ve Yılmaz, F., "SiC seramik partikül takviyeli alüminyum-silisyum metal esaslı kompozitlerin üretimi ve özelliklerinin incelenmesi", *7. Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi*, Ankara, 2: 1183-1194 (1993)
- 94- Hung, N.P., Boey, F.Y.C., Khor, K.A., Oh, C.A. ve Lee, H.F., "Machinability of cast and powder-formed aluminium alloys reinforced with SiC particles", *Journal of Materials Processing Technology*, 48: 291-297 (1995)
- 95- Ozcatalbas, Y., "Investigation of the machinability of Al₄C₃ reinforced Al-based composite produced by mechanical alloying", *Composites Science and Technology*, 63: 53-61 (2003)

ÖZGEÇMİŞ

1970 yılında Kırıkkale’de doğan İbrahim ÇİFTÇİ, 1993 yılında Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Makina Eğitimi bölümünden mezun oldu. Mezuniyetinden 1 yıl sonra Orta Doğu Teknik Üniversitesinde yaklaşık 8 ay yoğun İngilizce kursuna devam ettikten sonra Milli Eğitim Bakanlığı bursuyla lisansüstü çalışma yapmak üzere 1995 yılında İngiltere’ye gitti. İngiltere’de bir süre dil kursuna devam ettikten sonra Coventry Üniversitesi Mühendislik Fakültesinde İleri İmalat Sistemleri Mühendisliği programında yüksek lisans programına başladı ve Ekim 1996 yılında buradan yüksek lisans (MSc) derecesi aldı. 1998 yılında yurda döndü ve Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Karabük Teknik Eğitim Fakültesi Makina Eğitimi Bölümünde araştırma görevlisi olarak göreve başladı. 1999 yılı Ekim ayında Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde doktora öğrencisi iken Yüksek Öğretim Kanununun ilgili maddesi gereğince aynı enstitüde araştırma görevlisi olarak göreve başladı ve doktora çalışmalarının burada devam ettirdi. Halen aynı enstitüde araştırma görevlisi olarak çalışan İbrahim ÇİFTÇİ evlidir.