

**ALÜMİNYUM MATRİSLİ B₄C TAKVİYELİ VE GRAFİT KATKILI
KOMPOZİTLERİN ÜRETİLMESİ, MEKANİK ÖZELLİKLERİ VE
FREZEDE İŞLENEBİLİRLİĞİNİN İNCELENMESİ**

Ergün EKİCİ

**DOKTORA TEZİ
MAKİNA EĞİTİMİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MAYIS 2012
ANKARA**

Ergün EKİCİ tarafından hazırlanan ALÜMİNYUM MATRİSLİ B₄C TAKVİYELİ VE GRAFİT KATKILI KOMPOZİTLERİN ÜRETİLMESİ, MEKANİK ÖZELLİKLERİ VE FREZEDE İŞLENEBİLİRLİĞİNİN İNCELENMESİ adlı bu tezin Doktora tezi olarak uygun olduğunu onaylım.

Prof. Dr. Mahmut GÜLESİN

Tez Danışmanı, Makine Eğitimi Anabilim Dalı



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

Prof. Dr. Ramazan ÇITAK

Metal Eğitimi Anabilim Dalı, G. Ü.



Prof. Dr. Mahmut GÜLESİN

Makine Eğitimi Anabilim Dalı, G. Ü.



Prof. Dr. Yusuf ÖZÇATALBAŞ

Metal Eğitimi Anabilim Dalı, G. Ü.



Doç. Dr. İhsan KORKUT

Makine Eğitimi Anabilim Dalı, G. Ü.



Yrd. Doç. Dr. Yakup TURGUT

Makine Eğitimi Anabilim Dalı, G. Ü.




Tarih: 31/05/2012

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

Prof. Dr. Bilal TOKLU

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü



TEZ BİLDİRİMİ

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

Ergün EKİCİ

**ALÜMİNYUM MATRİSLİ B₄C TAKVİYELİ VE GRAFİT KATKILI
KOMPOZİTLERİN ÜRETİLMESİ, MEKANİK ÖZELLİKLERİ VE
FREZEDE İŞLENEBİLİRLİĞİNİN İNCELENMESİ**
(Doktora Tezi)

Ergün EKİCİ

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Mayıs 2012**

ÖZET

Bu çalışmada, toz metalurjisi yöntemiyle B₄C parçacık takviyeli ve Gr katkılı metal matrisli (MMK) kompozit malzemeler üretilmiştir. Kompozitlerin üretiminde matris malzemesi olarak 200 µm altı ön alaşımlı Alumix 123 tozu, takviye elemanı olarak ise ortalama 22~32 µm boyutunda B₄C ve ortalama 150 µm boyutlarında nikel kaplı grafit parçacıklar kullanılmıştır. Matris malzemesi Alumix 123 olmak üzere ağırlıkça %5 B₄C, %10 B₄C ve %15 B₄C parçacık takviyeli, ayrıca %10 B₄C'e ilave olarak %1 Gr, %3 Gr, %5 Gr katkılı olmak üzere yedi farklı numune sıcak presleme yöntemiyle üretilmiştir. Üretilen tüm kompozitlere T6 ısıtma işlemi uygulanarak mikroyapıları ve sertlik, yoğunluk ve çapraz kırılma dayanımları gibi mekanik özellikleri incelenmiştir. Mikroyapı incelemeleri sonrasında takviye parçacıklarının matrisde homojen dağılım sağlandığı görülmüştür. T6 ısıtma işleminin kompozitlerin sertlikleri üzerinde ciddi etkisi olduğu tespit edilmiş ve en yüksek sertlik değeri %15 B₄C takviyeli numunede 173 BSD olarak belirlenmiştir. En yüksek Çapraz Kırılma Mukavemeti (ÇKM) takviyesiz numunede ölçülürken, en düşük ÇKM %5 Gr katkılı numunede ölçülmüştür.

MMK numuneler, kaplamalı ve kaplamasız sementit karbür ve kübik bor nitrid kesici takımlar kullanılarak CNC freze tezgahında işlenebilirlik

deneylerine tabi tutulmuştur. İşlenebilirlik deneyleri kuru kesme şartları altında gerçekleştirilmiştir. Deneyler dört farklı kesme hızında (50, 65, 85 ve 110 m/min), sabit kesme derinliği (0,5 mm) ve sabit ilerleme hızında (0,11 mm/rev) gerçekleştirilmiştir. Tüm numunelerin işlenebilirliğinde kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülüğü ölçülmüş, takım aşınması deneyleri B₄C+Gr katkılı numunelerde uygulanmıştır. Numunelerde artan B₄C miktarına bağlı olarak kesme kuvvetlerinde bir artış görülmüş, kesme kuvvetlerinin en yüksek değerine %15 B₄C takviyeli numunede ulaşılmıştır. B₄C+Gr katkılı kompozitler için artan Gr miktarıyla birlikte kesme kuvvetleri azalmıştır. Yüzey pürüzlülüğü açısından değerlendirildiğinde en kötü yüzey kalitesine %15 B₄C kodlu numunede ulaşılmıştır. Kesici takımlarda etkin aşınma mekanizmasının abrasiv aşınma mekanizması olduğu belirlenmiş, artan Gr miktarına bağlı olarak serbest yüzey aşınmasında azalma görülmüştür. Tüm işleme şartlarında en iyi performansı kübik bor nitrür kesici göstermiştir.

Bilim Kodu : 708.3.028
Anahtar Kelimeler : Metal matrisli kompozit (MMK), toz metalurjisi, sıcak presleme, işlenebilirlik, kesme kuvvetleri, yüzey pürüzlülüğü
Sayfa Adedi : 187
Tez Yöneticisi : Prof. Dr. Mahmut GÜLESİN

**THE MANUFACTURE OF ALUMINIUM MATRIX COMPOSITES WITH
B₄C REINFORCING ELEMENT AND ADDITION OF GRAPHITE AND
THE ANALYSIS OF MECHANICAL FEATURES AND THEIR
MACHINABILITY ON MILLING**

(Ph.D.Thesis)

Ergün EKİCİ

**GAZİ UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY**

May 2012

ABSTRACT

In this study, metal matrix composite materials with B₄C particle-reinforced and Gr addition were produced via powder metallurgy technique. In the production of composites, as a matrix material under 200 µm-sized master alloy Alumix 123 powder and as a reinforcing member, 22~32 µm B₄C and average 150 µm-sized nickel-covered graphite powders were used. Seven different samples (in weight, 5% B₄C, 10% B₄C and 15% B₄C particle-reinforced, 1% Gr, 3% Gr, reinforced 5% Gr added 10% B₄C and Alumix 123) were produced with hot pressing technique. By applying precipitation hardening to all composites, some of the mechanic features (hardness, density and cross-breaking strengths) and microstructures were analyzed. After microstructure analysis, homogeneous distribution was identified. Heat treatment has a great effect on the hardness of the composites and 15% B₄C reached the highest hardness. The highest cross-breaking strength was measured on matrix alloy composites and the cross breaking strengths was measured on the 5% Gr added sample.

The samples were tested for their machinability with milling technique by using coated and uncoated cementite carbide and cubic boron nitrides cutting tools.

Machinability tests were carried out under dry cutting conditions. The tests were carried out with four different cutting speeds between 50-110 m/min, 0,5 cutting depth and 0,11 fixed feed rate. All the samples were analyzed for cutting force and surface roughness in the aspect of machinability. Tool wear tests were carried out in the samples reinforced with B₄C+Gr. Depending on the ratio of B₄C in the samples, increase in the cutting force was identified and the highest value was determined in the samples reinforced with 15% B₄C. However, the cutting force for B₄C+Gr added composites decreased. In the aspect of surface roughness, the lowest value was determined in 15% B₄C. Active wear mechanism was identified to be the abrasive wear mechanism and depending on the increasing Gr rate, decrease in flank wear was identified. Under all conditions cubic boron nitrides had the highest performance among cutting tools.

Science code : 708.3.028
Key words : Metal matrix composite (MMC), composite,
powder metallurgy, hot pressing, machinability,
cutting forces, surface roughness
Page number : 187
Adviser : Prof. Dr. Mahmut GÜLESİN

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren danışmanım Sayın Prof. Dr. Mahmut GÜLESİN'e yine kıymetli bilgilerinden faydalandığım Sayın Prof. Dr. Yusuf ÖZÇATALBAŞ'a, Sayın Doç Dr. Adem ÇİÇEK'e, Sayın Yrd. Doç. Dr. Yakup TURGUT'a, Sayın Yrd. Doç. Dr. Gökhan SUR'a, Sayın Yrd. Doç. Dr. Volkan KILIÇLI'ya, Sayın Yrd. Doç. Dr. Yunus KAYIR'a, Sayın Öğr. Gör. Hanifi ÇİNİCİ'ye, Sayın Gökhan ÇETİNKAYA'ya diğer tüm çalışma arkadaşlarım ile manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen aileme teşekkürü bir borç bilirim.

Ayrıca bu çalışmayı, 07/2010-37 nolu proje ile destekleyen Gazi Üniversitesi Rektörlüğü Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi'ne teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT	vi
TEŞEKKÜRLER	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	xiv
RESİMLERİN LİSTESİ	xix
SİMGELER VE KISALTMALAR	xxi
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR TARAMASI.....	4
2.1. Kompozitlerin Üretimi ve Mekanik Özellikleri ile İlgili Yapılan Çalışmalar	4
2.2. MMK'lerin Üretimi ve Mekanik Özellikleri Üzerine Yapılan Çalışmaların Değerlendirilmesi	12
2.3. MMK'lerin İşlenebilirliği ile İlgili Yapılan Çalışmalar	13
2.4. MMK'lerin İşlenebilirliği ile İlgili Yapılan Çalışmaların Değerlendirilmesi	25
3. KOMPOZİT MALZEMELER	27
3.1. Kompozitlerin Yapısı.....	28
3.2. Kompozit Malzemelerde Kullanılan Takviye Elemanları	29
3.2.1. Elyaflar.....	31
3.2.2. Kılcal kristaller	32
3.2.3. Parçaçık ve partiküller.....	33
3.2.3. Laminatlar	35

Sayfa

3.3. Kompozitlerin Sınıflandırılması.....	36
3.3.1. Polimer matrisli kompozit malzemeler	36
3.3.2. Metal matrisli kompozit (MMK) malzemeler	37
3.4. Metal Matrisli Kompozitlerin Üretim Yöntemleri	43
3.4.1. Sıvı hal üretim yöntemleri.....	44
3.4.2. Katı hal üretim yöntemleri	48
3.4.3. Katı-sıvı hal üretim yöntemleri	50
4. TOZ METALURJİSİ	51
4.1. Toz Metalurjisinin Teknik Özellikleri.....	51
4.2. Toz Üretimi	53
4.2.1. Mekanik üretim yöntemleri.....	54
4.2.2. Atomizasyon yöntemleri	56
4.3. Tozların Sıkıştırılması	58
4.3.1. İzostatik presleme	60
4.3.2. Sıcak presleme (SP).....	63
4.4. Sinterleme	64
4.4.1. Katı hal sinterleme	64
4.4.2. Sıvı hal sinterleme	67
5. TALAŞLI İMALAT ve İŞLENEBİLİRLİK	69
5.1. Talaşlı İmalat Mekaniği ve Talaş Oluşumu	70
5.2. Frezeleme İşleminin Mekaniği.....	72
5.3. Yığıntı Talaş Oluşumu	74
5.4. Frezede Kesme Kuvvetleri	76

	Sayfa
5.5. Takım Aşınması	78
6. MATERYAL ve METOT	81
6.1. Kompozit Malzeme Üretimi	81
6.2. Matris ve Takviye Fazı Malzemeleri.....	82
6.2.1. Ana faz (matris) malzemesi.....	82
6.2.2. Takviye fazı malzemeleri.....	83
6.3. Tozların Yüzde Ağırlık Oranlarının Belirlenmesi.....	84
6.4. Tozların Karıştırılması.....	86
6.5. Tozların Sıkıştırılması ve Sinterlenmesi.....	87
6.6. Çökeltme Isıl İşlemi.....	89
6.7. Yoğunluk Ölçüm Cihazı	89
6.8. Metalografik İnceleme için Ön Hazırlık.....	90
6.9. Sertlik Ölçümü	90
6.10. Çapraz Kırılma Mukavemeti Ölçümü	91
6.11. İşlenebilirlik Deneyleleri	92
6.11.1. Takım tezgahı, takım tutucular, kesici takımlar ve kesme parametreleri	92
6.11.2. Numunelerin bağlanması.....	95
6.11.3. Kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğünün ölçülmesi	96
6.11.4. Kesme kuvveti ve bileşenlerinin ölçülmesi.....	97
7. DENEYSEL BULGULAR ve TARTIŞMA	103
7.1. Malzeme Özellikleri	103
7.2. Kompozit Numunelerin Metalografik İncelemeleri.....	104

	Sayfa
7.3. Yoğunluk Sonuçlarının Değerlendirilmesi	110
7.4. Sertlik Sonuçlarının Değerlendirilmesi	111
7.5. Çapraz Kırılma Mukavemetinin Değerlendirilmesi	113
7.6. Kırık Yüzeylerin SEM İncelemeleri.....	115
7.7. İşlenebilirlik Deneylei	120
7.7.1. Kesme kuvvetlerinin değerlendirilmesi	120
7.7.2. Kesici takım aşınması	142
7.7.3. Yüzey pürüzlülüğünün değerlendirilmesi	157
8. SONUÇLAR ve ÖNERİLER	163
KAYNAKLAR.....	168
EKLER.....	183
Ek-1 Alumix 123 kodlu matris tozunun boyut analizi.....	184
ÖZGEÇMİŞ.....	185

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3.1. MMK kullanılan bazı önemli takviye malzemeleri.....	30
Çizelge 3.2. Çeşitli parçacık tipindeki takviye elemanlarının tipik özellikleri	31
Çizelge 3.3. Çeşitli elyaf tipindeki takviye elemanlarının özellikleri.....	32
Çizelge 3.4. Çeşitli kılcal kristal tipindeki takviye elemanlarının özellikleri	33
Çizelge 3.5. Parçacık tipindeki çeşitli takviye elemanlarının özellikleri.....	34
Çizelge 3.6. Dövme alüminyum alaşımları ve ısıl işlem durumları	38
Çizelge 3.7. Döküm alüminyum alaşımları ve ısıl işlem durumları	39
Çizelge 3.8. Bor karbürün genel özellikleri	42
Çizelge 5.1. Kesici takımında görülen aşınma tipleri, nedenleri ve muhtemel sebepleri.....	79
Çizelge 5.1. Kesici takımında görülen aşınma tipleri, nedenleri ve muhtemel sebepleri (Devamı)	80
Çizelge 6.1. Matris malzemenin (Alumix 123) kimyasal bileşimi.....	82
Çizelge 6.2. Matris malzemenin (Alumix 123) elek analizi sonuçları	83
Çizelge 6.3. Üretimi gerçekleştirilen numuneler.....	85
Çizelge 6.4. Takviye elemanlarının oranları ve ağırlıkları	86
Çizelge 6.5. Johnford VMC 850 CNC dik işleme merkezinin teknik özellikleri.....	93
Çizelge 6.6. Kesici uçlara ait teknik özellikler.....	94
Çizelge 6.7. Deneylerde kullanılan işleme parametreleri	95
Çizelge 6.8. Yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazının teknik özellikleri	97
Çizelge 6.9. Kesme kuvveti bileşenleri.....	101
Çizelge 7.1. Üretilen numunelerin yoğunluk değerleri.....	110

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 3.1. Parçacık takviyeli kompozitin bünyesinde oluşan ara yüzey ve ara fazlar.....	29
Şekil 3.2. Petek yapılı kompozit levhaların iç kısmını oluşturan bal peteği denilen kısım	35
Şekil 3.3. Sandviç panelin yapıştırılarak elde edilmesi	36
Şekil 3.4. Toz metalurji ürünlerin üretim basamakları	50
Şekil 4.1. Metalik toz işleme akış şeması.....	52
Şekil 4.2. Tozların üretim aşamaları	52
Şekil 4.3. Toz metalurjisindeki muhtemel parçacık şekilleri	53
Şekil 4.4. Öğütme yöntemiyle toz üretimi	54
Şekil 4.5. Değişik öğütme ve karıştırma makineleri.....	55
Şekil 4.6. Mekanik alaşımlamanın şematik gösterimi	55
Şekil 4.7. TM'de preslemenin aşamaları.....	58
Şekil 4.8. Sıkıştırma sırasında uygulanan basıncın etkisi	59
Şekil 4.9. Soğuk izostatik preslemenin aşamaları	61
Şekil 4.10. Sıcak izostatik presleme ünitesinin şematik resmi.....	62
Şekil 4.11. Tek eksenli sıcak preslemenin kesit görünüşü.....	63
Şekil 4.12. Sıcak presleme işlem basamakları	64
Şekil 4.13. Sinterlemede nokta teması ile başlayan ve parçacıklar arası bağ gelişimini gösteren iki küre sinterleme modeli	65
Şekil 4.14. Sinterlemenin basamaklarına göre gözenek yapısındaki değişim.....	66
Şekil 4.15. Karışım tozlarının sıvı faz sinterleme ile klasik üretimi aşamaları.....	68
Şekil 5.1. Dik kesme geometrisi, düzlemsel parçalarda ortogonal kesme	70

Şekil	Sayfa
Şekil 5.2. Ortogonal kesmede oluşan deformasyon bölgeleri	70
Şekil 5.3. Simetrik frezeleme	72
Şekil 5.4. Asimetrik aynı ve zıt yönlü frezeleme.....	73
Şekil 5.5. YT periyodik değişimi ve kopması	73
Şekil 5.6. Yığıntı talaş oluşumu ve işlenmiş yüzey üzerinden taşınımı.....	74
Şekil 5.7. Kesici takım ve iş parçası hareketlerine bağlı olarak kesme işlemi esnasında oluşan kuvvetler ve yönleri	76
Şekil 5.8. Kesme kuvveti bileşenleri ve yönleri	76
Şekil 6.1. Kompozit numunelerin üretiminde deneysel çalışmanın akış şeması.....	81
Şekil 6.2. Çapraz kırılma deney aparatının şematik gösterimi	91
Şekil 6.3. İşlenebilirlik deneylerinin akış şeması	92
Şekil 6.4. İşlenebilirlik deneylerinde kullanılan takım tutucunun özellikleri	93
Şekil 6.5. Kesici ucun şematik geometrisi..	94
Şekil 6.6. İşlenebilirlik deney numunelerinin boyutları.....	95
Şekil 6.7. DynoWare programı ile elde edilen kesme kuvvetleri ve moment grafiği	98
Şekil 6.8. Kararlı bir kesme işleminin başlama mesafesi.....	99
Şekil 6.9. DynoWare programında kesme kuvvetlerinin belirlenmesi, 11 ve 11,4 s içerisinde, kesme kuvvetlerine ait değişim grafikleri.....	100
Şekil 6.10. Kesici takım ucunda oluşan kesme kuvveti bileşenleri.....	101
Şekil 6.11. Bileşke kesme kuvvetinin çizim metoduyla tespit edilmesi	102
Şekil 7.1. B ₄ C miktarına bağlı olarak yoğunluk değerleri	111
Şekil 7.2. B ₄ C+Gr katkılı kompozitlerin Gr miktarına bağlı olarak yoğunluk değerleri	111
Şekil 7.3. B ₄ C miktarına bağlı olarak kompozitlerin sertlik değerleri.....	112

Şekil	Sayfa
Şekil 7.4. B ₄ C+Gr katkıli kompozitlerin Gr miktarına bağlı olarak sertlik değerleri	113
Şekil 7.5. B ₄ C miktarına bağlı olarak kompozitlerin ÇKM değerleri.....	114
Şekil 7.6. B ₄ C+Gr katkıli kompozitlerin Gr miktarına bağlı olarak ÇKM değerleri	114
Şekil 7.7. Alumix 123 kodlu malzemenin işlenmesinde değişen kesme hızlarında kesme kuvvetinin değişimi	121
Şekil 7.8. Alumix 123 kodlu numunenin işlenmesinde kesme hızına bağlı olarak ölçülen kesme kuvveti bileşenleri.....	122
Şekil 7.9. Farklı kesme hızlarında % B ₄ C parçacık miktarına bağlı olarak ölçülen kesme kuvvetleri	124
Şekil 7.10. %5 B ₄ C takviyeli kompozitin işlenmesinde değişen kesme hızlarında kesme kuvvetinin değişimi	127
Şekil 7.11. %5 B ₄ C takviyeli kompozitin işlenmesinde kesme hızına bağlı olarak ölçülen kesme kuvveti bileşenleri.....	128
Şekil 7.12. %10 B ₄ C takviyeli kompozitin işlenmesinde değişen kesme hızlarında kesme kuvvetinin değişimi	129
Şekil 7.13. % 10 B ₄ C takviyeli kompozitin işlenmesinde kesme hızına bağlı olarak ölçülen kesme kuvveti bileşenleri.....	131
Şekil 7.14. Kesici ucun kesici kenar geometrisi.....	131
Şekil 7.15. %15 B ₄ C takviyeli kompozitin işlenmesinde değişen kesme hızlarında kesme kuvvetinin değişimi	132
Şekil 7.16. %15 B ₄ C takviyeli kompozitin işlenmesinde kesme hızına bağlı olarak ölçülen kesme kuvveti bileşenleri.....	134
Şekil 7.17. %10 B ₄ C sabit parçacık oranı ve artan Gr miktarına bağlı olarak üretilen kompozitlerin işlenmesinde ölçülen kesme kuvvetleri	136
Şekil 7.18. %1 Gr katkıli kompozitin işlenmesinde değişen kesme hızlarında kesme kuvvetinin değişimi.....	137
Şekil 7.19. %1 Gr katkıli kompozitin işlenmesinde kesme hızına bağlı olarak ölçülen kesme kuvveti bileşenleri	138

Şekil	Sayfa
Şekil 7.20. %3 Gr katkılı kompozitin işlenmesinde değişen kesme hızlarında kesme kuvvetinin değişimi.....	139
Şekil 7.21. %3 Gr katkılı kompozitin işlenmesinde kesme hızına bağlı olarak ölçülen kesme kuvveti bileşenleri	140
Şekil 7.22. %5 Gr katkılı kompozitin işlenmesinde değişen kesme hızlarında kesme kuvvetinin değişimi.....	141
Şekil 7.23. %5 Gr katkılı kompozitin işlenmesinde kesme hızına bağlı olarak ölçülen kesme kuvveti bileşenleri	142
Şekil 7.24. Artan % Gr miktarına bağlı olarak, yan yüzey aşınma grafikleri	144
Şekil 7.25. MMK'lerin kaplamasız SK takım ile işlenmesinde kesici takım esas kesme kenarı yan yüzeyinde oluşan aşınma değerleri.....	146
Şekil 7.26. MMK'lerin kaplamalı SK takım ile işlenmesinde kesici takım esas kesme kenarı yan yüzeyinde oluşan aşınma değerleri.....	151
Şekil 7.27. MMK'lerin KBN kesici takım ile işlenmesinde kesici takım esas kesme kenarı yan yüzeyinde oluşan aşınma değerleri.....	153
Şekil 7.28. Kesme hızına bağlı olarak B ₄ C takviyeli kompozitlerin frezelenmesinde ölçülen ortalama yüzey pürüzlülüğü değer grafikleri.....	158
Şekil 7.29. Kesme hızına bağlı olarak B ₄ C+Gr katkılı kompozitlerin frezelenmesinde ölçülen ortalama yüzey pürüzlülüğü değer grafikleri.....	161

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 6.1. Alumix parçacıklar	82
Resim 6.2. Bor karbür parçacıklar	83
Resim 6.3. Nikel kaplı grafit parçacıklar	84
Resim 6.4. Sıcak presleme işleminde kullanılan makine ve cihazlar	87
Resim 6.5. Sıcak presleme kalıbı.....	88
Resim 6.6. Numunelerin kalıptan çıkartılması	89
Resim 6.7. MMK numunelerin bağlama aparatına bağlanması	96
Resim 6.8. Dinamometre ve kuvvet yönleri.....	96
Resim 7.1. Alumix 123 tozunun SEM görüntüleri	103
Resim 7.2. B ₄ C parçacıklarının SEM görüntüleri	104
Resim 7.3. Gr parçacıklarının SEM görüntüleri.....	104
Resim 7.4. Alumix 123 kodlu numunenin mikroyapı görüntüleri	105
Resim 7.5. %5 B ₄ C kodlu numunenin mikroyapı görüntüleri	105
Resim 7.6. Parçacık-matris ara yüzeyi SEM görüntüsü ve EDS analizi sonuçları	106
Resim 7.7. %10 B ₄ C kodlu numunenin mikroyapı görüntüleri.....	107
Resim 7.8. %15 B ₄ C kodlu numunenin mikroyapı görüntüleri.....	107
Resim 7.9. %10 B ₄ C + %1 Gr kodlu numunenin optik görüntüsü	108
Resim 7.10. %10 B ₄ C + %1 Gr kodlu numunenin mikroyapı görüntüleri	109
Resim 7.11. %10 B ₄ C + %3 Gr kodlu numunenin mikroyapı görüntüleri	109
Resim 7.12. %10 B ₄ C + %5 Gr kodlu numunenin mikroyapı görüntüleri	109
Resim 7.13. Alumix 123 kodlu numunenin kırık yüzeyinin SEM görüntüleri	115

Resim	Sayfa
Resim 7.14. %5 B ₄ C takviyeli kompozitin kırık yüzeyinin SEM görüntüleri	116
Resim 7.15. %15 B ₄ C takviyeli kompozitin kırık yüzey SEM görüntüleri	117
Resim 7.16. %1 Gr katkılı kompozitin kırık yüzey SEM görüntüleri	118
Resim 7.17. %5 Gr katkılı kompozitin kırık yüzey SEM görüntüleri	119
Resim 7.18. %10 B ₄ C takviyeli MMK'in kaplamasız SK takım 5~6 mm işlenmesinde kesici takım esas kesme kenarı yan yüzeyinde oluşan aşınmalar	126
Resim 7.19. Kaplamalı SK kesicinin talaş yüzeyi ve serbest yan yüzeyinin Map analizi sonuçları	145
Resim 7.20. %10 B ₄ C takviyeli kompozitin kaplamasız SK kesici takım 50 m/min kesme hızında işlenmesi sonrasında çekilen SEM fotoğrafları.....	147
Resim 7.21. %10 B ₄ C takviyeli kompozitin kaplamasız SK kesici takım 110 m/min kesme hızında işlenmesi sonrasında çekilen SEM fotoğrafları.....	148
Resim 7.22. %5 Gr katkılı kompozitin kaplamasız SK kesici takım 50 m/min kesme hızında işlenmesi sonrasında çekilen SEM fotoğrafları.....	149
Resim 7.23. %5 Gr katkılı kompozitin kaplamasız SK kesici takım 110 m/min kesme hızında işlenmesi sonrasında çekilen SEM fotoğrafları.....	149
Resim 7.24. %10 B ₄ C takviyeli kompozitin kaplamalı SK kesici takım 50 m/min kesme hızında işlenmesi sonrasında çekilen SEM fotoğrafları.....	150
Resim 7.25. %10 B ₄ C takviyeli kompozitin kaplamalı kesici takım işlenmesi sonrasında çekilen kesici takım SEM fotoğrafları.....	152
Resim 7.26. %5 Gr katkılı kompozitin kaplamalı kesici takım işlenmesi sonrasında çekilen kesici takım SEM fotoğrafları.....	152
Resim 7.27. %10 B ₄ C takviyeli kompozitin KBN kesici takım işlenmesi sonrasında çekilen kesici takım SEM fotoğrafları.....	154
Resim 7.28. %5 Gr katkılı kompozitin KBN kesici takım işlenmesi sonrasında çekilen kesici takım SEM fotoğrafları	155

Resim	Sayfa
Resim 7.29. %10 B ₄ C takviyeli kompozitin 50 m/min kesme hızında işlenmesi sonrasında çekilmiş kesici takım SEM fotoğrafları.....	155
Resim 7.30. %10 B ₄ C takviyeli kompozitin 110 m/min kesme hızında işlenmesi sonrasında çekilmiş kesici takım SEM fotoğrafları.....	156
Resim 7.31. %5 Gr katkılı kompozitin 110 m/min kesme hızında işlenmesi sonrasında çekilmiş kesici takım SEM fotoğrafları.....	157

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklama
a	Kesme derinliği, (mm)
f	İlerleme hızı, (mm/rev)
F	Kesme kuvveti, (N)
F_c, (F_y)	Teğetsel kuvvet, (N)
F_f, (F_x)	İlerleme kuvveti, (N)
F_r, (F_z)	Radyal kuvvet, (N)
n	Devir sayısı, (rev/min)
V	Kesme hızı, (m/min)
P	Basınç, (kg/mm ²)
γ	Talaş açısı, (°)
φ	Yoğunluk, (g/cm ³)
R_a	Ortalama yüzey pürüzlülük değeri, (μm)
V_B	Yan kenar aşınması, (mm)

Kısaltmalar	Açıklama
Al₂O₃	Alüminyum oksit
B₄C	Bor karbür
BHN	Brinell sertlik değeri
BSD	Bilgisayarlı Sayısal Denetim
CVD	Chemical vapour deposition (Kimyasal buhar biriktirme)
ÇKE	Çok kristalli elmas
ÇKM	Çapraz kırılma mukavemeti
İ/M	İngot metalurjisi
KBN	Kübik bor nitrür
MA	Mekanik alaşımlama
MMK	Metal matrisli kompozit
PVD	Physical vapour deposition (Fiziksel buhar biriktirme)
SEM	Scanning Electron Microscopy (Tarama elektron mikroskobu)
SiC	Silisyum karbür
SİP	Sıcak izostatik presleme
SP	Sıcak presleme
SK	Sementit karbür
TiAlN	Titanyum alüminyum nitrür
TiC	Titanyum karbür
TiCN	Titanyum karbon nitrür
TiN	Titanyum nitrür
TM	Toz matalurjisi
YT	Yığıntı talaş
WC	Tungsten karbür

1.GİRİŞ

Malzeme tasarımı son 40 yıl boyunca hafiflik, çevre dostu, düşük maliyet, yüksek dayanım ve kalite özelliklerine doğru kaymıştır. Bu eğilime paralel olarak metal matrisli kompozitlere (MMK) olan ilgi de giderek artmıştır [1]. Kompozit iki veya daha çok malzemenin (kimyasal yapısı farklı birbiri içerisinde çözünmeyen) mikro veya makro düzeyde bileşiminden oluşan malzeme sistemi olarak tanımlanır [2]. Diğer bir deyişle geleneksel malzemeler ile karşılaştırıldıkları zaman eşsiz özelliklere sahip malzeme üretmek için kimyasal özellikleri farklı iki veya daha fazla malzemenin birleşiminden oluşan yapılardır [3]. Alüminyum esaslı metal matrisli kompozitler, yüksek elastik modülü, dayanım, iyi yorulma ve aşınma direnci, düşük yoğunluk da dahil olmak üzere, daha iyi mekanik özellikleri sayesinde havacılık ve otomotiv uygulamaları için gelişmiş mühendislik malzemeleri arasında büyük ilgi görmektedir [4].

Kompozitlerin özelliklerini başarılı bir şekilde kazanabilmesi için takviye elemanının matris içerisinde homojen bir şekilde dağılması gerekmektedir. Toz metalurujisi (TM) tekniğinin döküm işlemine nazaran takviye elemanının daha iyi bir şekilde dağılmasına katkıda bulunduğu bilinmektedir [5]. TM işlemi ilk olarak geleneksel döküm, sıcak ve soğuk presleme ve talaş kaldırma üretim yöntemlerine alternatif olarak geliştirilmiştir. TM, imali zor parçaların (küçük, fonksiyonel, birbiri ile uyumsuz, kompozit yapılar, vb) toz formunda hammaddelerden başlayarak ekonomik, yüksek mukavemet ve minimum toleransla (düşük fireli olarak) diğer üretim yöntemlerine kıyasla daha avantajlı bir şekilde üretilme yöntem ve tekniğidir [6].

Günümüzde metalik toz işleme teknolojisine olan yönelimler ve bunun paralelinde malzeme üretimine yönelik araştırma ve geliştirme çalışmaları hız kazanmıştır. Metalik malzemelerin günümüz endüstrisinde kullanımı ise seramik ve plastik malzemelere kıyasla geniş bir alanı kapsamaktadır. Uzay, havacılık, askeri, otomotiv sanayisi başta olmak üzere çok çeşitli alanlarda kullanılan toz esaslı seri üretim parçaları, konvansiyonel üretim sonrası elde edilen malzemelere göre çoğu kez hem

maliyet, hem de üretilebilirlik özellikleri açısından avantajlı bir konumdadır [7]. Önceleri demir, demir dışı hafif metaller, refrakter, sermet, sert malzemeler ve sementit karbür gibi malzemelerin üretiminde yaygın olarak kullanılmakta iken şimdilerde kompozit ve ileri teknoloji seramiklerinin üretiminde de geniş ve yaygın kullanım imkanları sunmaktadır [6].

Parçacık takviyeli kompozitler, genel olarak SiC, Al₂O₃ ve B₄C gibi seramik takviye elemanları ile güçlendirilir [8]. Karma (hybrid) kompozitler ise farklı özelliklere sahip birden fazla takviye elemanının matrise katılmasıyla oluşur. Kompozitin mekanik ve tribolojik özelliklerinin geliştirilmesi için grafit seramik takviyeyle birlikte kullanılmaktadır [9]. MMK'ler mühendislik uygulamalarında yaygın olarak kullanılmalarına karşın yapılarında bulunan aşırı sert parçacıkların neden olduğu hızlı takım aşınmasından dolayı işlenebilirlikleri büyük bir problemdir [10]. MMK'lerin işlenebilirliği birçok araştırmacı tarafından kaplamalı ve kaplamasız sementit karbür (SK), kübik bor nitrürlü (KBN), çok kristalli elmas (ÇKE) kesici takımlar ile araştırılmıştır.

Bu çalışmada savunma sanayi ve havacılık uygulamalarında büyük önem arz eden MMK'lerin TM yöntemi ile üretiminde karşılaşılan (gözeneklilik ve düşük yoğunluk gibi) problemlerin azaltılması, işlenebilirlik özelliklerinin takviye elemanı tipi ve işleme parametrelerinin MMK'lerin işlenebilirliği, üzerindeki etkileri belirlenmeye çalışılmıştır. İlk olarak B₄C parçacık takviyeli ve B₄C+Gr katkılı (hybrid) olarak kompozitlerin sıcak presleme (SP) yöntemiyle üretilebilmesi için kalıp tasarımı gerçekleştirilmiş ve ısıtma sistemi hazırlanmıştır. Farklı yüzde oranlarında Al/B₄C ve doğal katı yağlayıcı özelliği bilinen grafit ilavesinin kompozitin işlenebilirliği üzerindeki etkilerinin belirlenebilmesi amacıyla Al/B₄C+Gr kompozitlerin üretimi gerçekleştirilmiştir. Kompozitin mekanik özelliklerinin geliştirilmesi açısından üretim sonrasında tüm numunelere çözelti ısıtma işlemi uygulanmıştır. MMK'lerin mikroyapılarının detaylı bir şekilde incelenip takviye elemanlarının dağılımlarının gözlenmesi amacıyla optik mikroskop ve tarama elektron mikroskobu (SEM) yardımıyla görüntüler incelenmiş, gözenekliliğin belirlenmesi açısından yoğunluk ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Takviye elemanı tipi ve yüzde takviye oranının

MMK'lerin mekanik özellikleri üzerindeki etkilerinin belirlenebilmesi açısından ısıtılma işlem öncesi ve sonrası olmak üzere sertlik ölçümleri gerçekleştirilmiş ve çapraz kırılma mukavemeti (ÇKM) deneyleri yapılmıştır. Ayrıca çapraz kırılma deneyi sonrasında kompozitin mekanik özelliklerine ışık tutabilmesi açısından kırık yüzeylerin SEM görüntüleri incelenmiştir.

Üretilen kompozitlerin işlenebilirlik özellikleri kesme kuvveti, yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınması açısından değerlendirilmiştir. Kesme parametreleri önceki literatür çalışmaları referans alınarak, takım üretici firmanın tavsiyeleri ve yapılan ön deneyler sonrasında belirlenmiştir. Deneylerde ilerleme ve kesme derinliği sabit tutularak dört farklı kesme hızına göre kuru kesme şartlarında gerçekleştirilmiştir. MMK'lerin işlenmesinde abresiv aşındırıcı etkisinden dolayı KBN kesiciler ve uygun maliyetlerinden ötürü kaplamalı ve kaplamasız SK kesiciler kullanılmıştır. Takım aşınması deneyleri SK ve KBN kesiciler için farklı olmak üzere sabit talaş hacminde gerçekleştirilmiş, takımlarda oluşan aşınma mekanizmaları SEM görüntüleri yardımıyla detaylı bir şekilde incelenmiştir. MMK'lerin üretimi ve işlenebilirlik özelliklerine en uygun işleme parametrelerinin belirlenmesi ve bu sayede endüstriyel uygulamalarda MMK'lerin kullanımının yaygınlaştırılması amaçlanmıştır.

2. LİTERATÜR TARAMASI

Son zamanlarda MMK'lerin üretimi için geliştirilen toz metalurjisi tekniği birçok avantajda beraberinde getirmiştir. Bu yöntemle geleneksel karıştırmalı döküm yöntemiyle zor elde edilebilen büyük miktarlarda seramik takviye elemanın homojen dağılımı sağlanabilmektedir [11]. Parçacıkların homojen dağılımın yanı sıra üretilen parçaların yoğunlukları da MMK'lerin mekanik özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Sıcak presleme ve sıcak izostatik presleme (SIP) ile takviye malzemeleri ilave etmeksizin düşük maliyetle %90'ın üzerindeki yoğunluklarda numuneler üretilmektedir [12]. MMK'lerin avantajlı özellikleri nedeniyle son yıllarda parçacık takviyeli olarak toz metalurjisi yöntemiyle üretimleri birçok araştırmacı tarafından araştırılmıştır. Bu çalışmaların çoğu, MMK'lerin üretim yöntemlerinde karşılaşılan sorunların çözümü ve düşük maliyetle üretimi üzerinde odaklanmaktadır. Bu bölümde farklı üretim yöntemleriyle üretilen MMK'lerin mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi, şekillendirme kabiliyetlerinin artırılması üzerine yapılan çalışmaların genel içeriği özetlenmiştir.

2.1. Kompozitlerin Üretimi ve Mekanik Özellikleri ile İlgili Yapılan Çalışmalar

Bedir, gözeneksiz parçaların üretimi ve ıslatılabilirliğinin iyileştirilmesi açısından, parçacık takviyeli kompozitlerin üretiminde sıcak presleme yönteminin geleneksel toz metalurjisi yöntemi karşısında çok daha etkili bir yöntem olduğunu belirtmiştir. Çalışmasında Al-%5Cu alaşımına hacimce %10, %20, %30 SiC ve %10, %20 B₄C tozları ilave ederek sıcak presleme davranışlarını incelemiştir. Sıcak presleme işlemini, ötektik sıcaklığın üzerinde 600 °C'de, 25 MPa basınç altında 5 dakika süreyle gerçekleştirmiştir. Isıl işlemin kompozitin sertliği üzerindeki etkilerini belirlemek amacıyla 530 °C sıcaklıkta çözelti ısıl işlemi uygulamış ve 180 °C'de 2, 4, 6, 8, 12, 20 ve 24 saat çeşitli yaşlandırma periyotlarında bekletmiştir. Isıl işlem sonrasında en iyi sertlik değerine 10 saat yaşlandırma süresiyle ulaşıldığını ve mikro yapı incelemeleri sonucunda da homojen bir dağılımın elde edildiğini bildirmiştir [13].

Wan, çalışmasında mikro ve nano boyuttaki Al/SiC takviyeli kompozitlerin mekanik alaşımlama (MA) ve sıcak presleme yöntemiyle üretimi ve mikro yapı özelliklerini araştırmıştır. Yapılan çalışmada matris elemanı olarak Al, takviye elemanı olarak ise %10 oranında 45 µm ve 20-50 nm boyutlarında SiC parçacıklar kullanılmıştır. Toz karışımlarını 10 saat bilyeli değirmende karıştırılarak süper alaşımdan yapılmış kalıp içerisine alınmış, argon gazı koruyucu atmosferi altında 10-100 MPa basınç ve 723-873 °K sıcaklık aralığında preslenmiştir. Deneyle sonuçunda 45 µm boyutundaki SiC parçacıklarının matris yapıda düzenli bir şekilde dağılımları için 2 saat karıştırma süresinin yeterli olduğu fakat 100 nm daha küçük SiC parçacıklar için 10 saat karıştırma zamanına ihtiyaç duyulduğu belirlenmiştir. Ayrıca toz metalurjisi yöntemiyle sıcak presleme işleminin 873 °K ve 10 MPa basınç altında yapılabildiği fakat 20-50 nm boyutlu parçacıkların homojen bir şekilde dağılımları için 723 °K sıcaklık ve 100 MPa basıncın gerekli olduğu bildirilmiştir [14].

Jiang ve arkadaşları tarafından, magnezyum matrisli B₄C takviyeli kompozitlerin toz metalurjisi yöntemi ile üretimi araştırılmıştır. Çalışmada sırasıyla 6 ve 106 µm boyutlarında magnezyum ve bor karbür tozları kullanılmıştır. %10, %15, %20 ve %30 oranlarında hazırlanan toz karışımları 6 saat bilyalı değirmende karıştırılarak 20-25 MPa basınç altında (57 mm çapında ve 50 mm numune boyutlarında) tek etkili preste soğuk olarak preslenmiştir. Preslenen numuneler vakumlu elektrik fırınında 620 °C sıcaklıkta argon gazı koruyucu atmosferi altında 1 saat sinterlenmiş daha sonra fırın sıcaklığını 300 °C düşürülerek 10 dakika 5 MPa basınç altında sıcak olarak preslenmiştir. Magnezyum matrisli kompozitler %10, %15, %20 ve %30 takviye oranlarında toz metalurjisi yöntemiyle başarılı bir şekilde üretimi gerçekleştirilmiştir. Mikro yapı karakterizasyonu ile takviye fazın matris içerisinde homojen bir şekilde dağıldığı ve kompozitlerde mikro gözenek varlığının az olduğunu tespit edilmiştir. X ışınım kırınimleri sonucunda B₄C/Mg kompozitlerde MgO ve MgB₂ fazlarının oluştuğunu ve B₄C parçacık takviyeli kompozitin, külçe döküm magnezyumla karşılaştırıldığında sertlik ve aşınma direnci bakımından dört kat daha iyi performans sergiledikleri görülmüştür [15].

Zhang ve arkadaşları, 6092 Al matrisli B₄C takviyeli kompozit parçaların üretiminde, bilyalı öğütme, soğuk izostatik presleme ve sinterleme sonrasında ekstrüzyon ve sıcak izostatik presleme olmak üzere iki farklı yöntem kullanarak MMK'lerin üretimini araştırmışlardır. Yapılan çalışmada ekstrüzyon numunelerin üretiminde 5 µm, sıcak izostatik presleme numunelerin üretiminde ise 20 µm boyutlarında olmak üzere %5, %10 ve %15 oranlarında B₄C tozları kullanılmıştır. Soğuk izostatik presleme 330 MPa, sıcak izostatik presleme 103 MPa basınç altında gerçekleştirilmiş, 550 °C sıcaklıkta sinterlenmiştir. Takviye elemanının mikroyapı üzerinde önemli bir rol oynadığı, takviye oranının artması ile de kompozitin dayanımının arttığı tespit edilmiştir. Kompozit malzemenin üretim yönteminin ise matris malzemenin dayanımı ve mikro yapısı üzerinde önemli etkileri olduğu belirlenmiştir. Yüksek basınçlarda sıcak izostatik presleme yöntemi ile üretilen kompozitlerin ara yüzelerinde bazı hasarların oluştuğu görülmüştür [16].

Suresha ve Sridhara tarafından, karma takviyeli kompozitlerin mekanik ve tribolojik özelliklerinin daha gelişmiş olması nedeniyle uygulama alanlarının genişlediği ve böylece parçacık takviyeli kompozitlerin yerine yaygın olarak kullanılmaya başlandığı belirtilmiştir. İkinci takviye elemanı olarak grafit ilavesinin SiC ile takviyelendirilmiş alüminyum matrisli kompozitlerin tribolojik özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. %2,5–%5–%7,5–%10 oranlarında SiC ve eşit miktarlarda Gr takviyesi ile üretilen karma kompozitlerde yük, kayma mesafesi ve kayma hızına bağlı olarak Gr ilavesinin kompozitin aşınma performansı üzerindeki etkisi kuru aşınma deneyleri ile araştırılmıştır. Takviye elemanı yüzdesinin %3 den %7,5 çıkarıldığında karma kompozitlerin aşınma miktarlarının 0,0234 g dan 0,0221 g düştüğü fakat takviye elemanı yüzdesinin %7,5 den %10 çıkartılmasıyla birlikte ise aşınma miktarının 0,0225 g olarak arttığı tespit edilmiştir. %3–%7,5–%10 oranlarında SiC takviyeli kompozitlerin aşınma miktarlarının sırasıyla 0,0323–0,0252–0,0223 olduğunu saptanmış ve karma takviyeli kompozitlerin SiC takviyeli kompozitlere nazaran daha iyi aşınma karakteristiğine sahip olduğu belirlenmiştir. Yük ve kayma mesafesinin aşınma üzerinde etkili olduğu, yük veya kayma mesafesinin veya her ikisinin artışı ile birlikte aşınma miktarlarının da arttığı tespit edilmiştir. Kayma hızındaki artışa bağlı olarak ise aşınma miktarının azaldığı görülmüştür [17].

Jianxin ve Junlong, çalışmalarında $B_4C/TiC/Mo$ seramik kompozitlerin sıcak presleme yöntemiyle üretiminde TiC ilavesinin mikroyapı ve mekaniksel özellikleri üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Yapılan çalışmada kütle oranı (18:1) olmak üzere (B_4C/Mo) matrisli kompozitler takviyesiz ve %5, %10, %15 ve %20 hacim oranlarında TiC takviyeli olarak sıcak presleme yöntemiyle üretilmiştir. Sıcak presleme yöntemiyle takviyesiz kompozitin üretimi 2150 °C sıcaklık ve 35 MPa basınç altında 65 dakika süreyle, TiC takviyeli kompozitlerin üretimi ise 1950 °C sıcaklıkta 35 MPa basınçta 50 dakika süreyle gerçekleştirmiştir. Çalışma sonrasında TiC takviyesiz kompozitte %99,2 yoğunluğa %10 TiC takviyeli kompozitte ise %95 yoğunluğa ulaşılmıştır. TiC ilavesinin kompozitin yoğunlaşma davranışını hızlandırdığı, artan TiC oranıyla birlikte kompozitin kopma dayanımı, eğilme dayanımı ve sertliğinin arttığı görülmüştür. Maksimum tokluk, eğilme ve sertliğe %10 TiC ilavesi sonrasında sırasıyla 4,3 m^{1/2}, 695 MPa ve 25,0 GPa olarak ulaşılmıştır [18].

Mohanty ve arkadaşları tarafından, yapılan çalışmada 1100 alüminyum matrisli kompozitlere farklı miktarlardaki bor karbür takviyesinin, mikro yapı ve mekanik özellikler üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Matris elemanı olarak 35-45 µm boyutlarında saf alüminyum tozları, takviye elemanı olarak ise %6, %10, %15, %25 oranlarda B_4C tozları kullanılmıştır. Karışım tozları 90 MPa basınç altında preslenerek, 600 °C sıcaklıkta koruyucu gaz atmosferi altında 90 dakika sinterlenmiştir. Al içerisindeki bor karbürün yüzde hacim artışı ile tane sınırlarında Al-B-C oluşumundan borca zengin Al-B oluşumuna geçiş olduğu ve bu geçişe bağlı olarak MMK'in dayanımının arttığı görülmüştür. Saf alüminyumun dayanımı 22 GPa iken %25 B_4C ilave edilerek dayanımda 183 GPa artış sağlanmıştır. Buna ilave olarak B_4C artışı ile elastikiyet modülünün arttığı, elektriksel iletkenlik ve eğilme dayanımının ise azaldığı tespit edilmiştir. MMK'in özelliklerinin ara yüzey bağımlı olarak artırılarak ve kompozitin içerisindeki gözenekli yapının azaltılması ile geliştirilebileceği belirtilmiştir [19].

Guel ve arkadaşları, metal kaplı (C-Cu, C-Ni, C-Ag) grafitler ve kaplamasız grafit olmak üzere farklı grafit dağılımlarının alüminyum esaslı kompozitlerin mekanik

özellikleri üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Yapılan çalışmada alüminyum matrisli Gr takviyeli kompozitlerin üretiminde MA yöntemi kullanılmıştır. Karışım tozları 1, 4 ve 8 saat farklı sürelerde öğütülerek, soğuk olarak preslenmiş ve düşük basınçta sinterlenmiştir. Sekiz saat öğütme sonrasında kırılan Cu-grafit parçacıklarının mikron altı seviyeye düştüğü ve yapıda daha homojen bir şekilde dağıldığı tespit edilmiştir. Diğer yandan Ag, Ni ile kaplanmış grafit parçacıklarının ise daha büyük boyutlu olduğu ve matris içerisinde kaba, homojen olmayan bir dağılım sergiledikleri görülmüştür. Grafit-gümüş kompozitlerin sunduğu düşük mekanik özelliklerin aksine mekanik öğütmenin güçlendirme aracı olarak en iyi seçenek olduğu belirlenmiştir. Akma dayanımının saf alüminyuma göre artış sergilediği ayrıca metal tipi, karıştırma zamanı ve konsantrasyonların kompozitin mekanik özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olmadığını görülmüştür [20].

Khan ve arkadaşları tarafından, Al-%5 Mg alaşımli B₄C parçacık takviyeli kompozitin sıcak sertlik ve çentik sürünme davranışı araştırılmıştır. Al-%5 Mg alaşımı elektrik fırınında 720 °C sıcaklıkta ergitilmiş karıştırma işlemi nitrojen gazı koruyuculuğunda seramik kaplı karıştırıcı ile 300-400 rev/min'de 1 saat süreyle gerçekleştirilmiştir. 500 °C sıcaklıktaki erğiyik içerisine B₄C parçacıkları yavaşça ilave edilmiş, parçacık ilavesi tamamlandıktan sonra karıştırma işlemine 5 dakika daha devam edilmiştir. Karışım 200 °C ön ısıtma işlemi uygulanmış döküm kalıp içerisine alınarak %10-%20 B₄C takviyeli kompozitler başarılı bir şekilde üretilmiştir. Sıcaklığın artması ile kompozitlerin mikro sertlikleri azalmıştır. Al-%5 Mg alaşımına B₄C'ün ilavesi ile geçiş sıcaklığının 262 °C'den 274 °C'ye yükseldiği, ayrıca sürünmenin artışı için gerekli olan aktivasyon enerjisinin B₄C içeriğinin artmasından dolayı belirgin bir şekilde arttığı sonucuna varılmıştır [21].

Nie ve arkadaşları, MA ve sıcak ekstürüzyon ile üretilen B₄C parçacık takviyeli Al 2024 matrisli kompozitin ara yüzey bağı ve mikroyapısını araştırmışlardır. Yapılan çalışmada ortalama parçacık boyutu 27 µm alüminyum ve 7 µm B₄C tozları kullanılmıştır. Karıştırma işleminden önce B₄C'nin kimyasal yapısında bulunan Fe₂O₃, SiO₂ ve serbest elementler gibi kirlerin etkisini yok etmek için 40 saat %5 HF sulu solüsyonun içinde tutularak iyonize suda durulanmıştır. Karıştırma işlemi 10

mm çapında çelik bilye ile 20:1 bilye toz oranında, argon gazı koruyucu atmosferinde gerçekleştirilmiştir. Toz karışımı 5 saat karıştırdıktan sonra çelik kalıp içerisine alınarak 400 MPa soğuk ve 300 MPa basınçta 570 °C'de sıcak olarak preslenmiştir. Daha sonra ekstrüzyon oranı 10:1 olmak üzere 480 C°'de sıcak olarak kalıpta çekilmiştir. Kalıbın iç duvarları ve numunelerin yüzeyleri yağlama amacıyla grafitle kaplanmıştır. Kompozitin ara yüzey üzerindeki MgO parçacıklarının etkisini ölçmek için farklı yüzey şartlarına sahip iki farklı B₄C parçacıkları kullanılmıştır. MA ve sıcak ekstrüzyon sonrasında B₄C parçacıklarının matris içerisinde homojen biçimde dağıldığı, MA'nın matris ile takviye elemanı arasında güçlü bir bağ oluşturduğu görülmüştür. Bu durum yüksek enerjili karıştırma işlemi esnasında sıcaklığın otomatik olarak yükselmesi, B₄C parçacıkları yüzeyinde B₂O₃ filminin oluşması, devamında MgO parçacıklarının oluşumu ve B₂O₃ ile magnezyum arasındaki reaksiyon sonrasında oluşan sıcaklıklara bağlanmıştır. MgO parçacıklarının matris ve takviye elemanı arasındaki ıslanmayı iyileştirdiği fakat çoğunlukla düşük katmanlarda ara yüzey sorunları meydana geldiği gözlenmiştir. Ayrıca yapıda Al₇Cu₂Fe gibi intermetalik fazlarında oluştuğu belirlenmiştir [22].

Topçu ve arkadaşları tarafından, 650 °C sinterlenen ortalama 10 µm parçacık boyutunda %5, %10, %15 ve %20 oranlarında B₄C takviyeli alüminyum matrisli kompozitlerin yüksek sıcaklıklardaki deformasyon davranışları araştırılmıştır. TM ile üretilen numunelerde homojen bir dağılım olduğu, takviye elemanın yüzde hacim oranının artışıyla birlikte darbe dayanımının azalarak sertliğin arttığı belirlenmiştir. Sinterleme sıcaklığının artmasıyla tüm B₄C numuneleri için teorik yoğunluğa yaklaşılmıştır. B₄C yüzde hacmi ve sinterleme sıcaklığının artması ile kompozitin sertliğinin arttığı, fakat %15 B₄C takviyesi için 625 °C üzerindeki sinterleme sıcaklıklarının kompozitin sertliği üzerindeki etkisini kaybettiği belirlenmiştir. B₄C parçacıkları 400-450 °C aralığındaki sıcaklıklarda alüminyum alaşımının sürünme direncini geliştirmiştir [23].

Kennedy, çalışmasında Al-%7 Si-%0,3 Mg matrisli %5 ve %10 oranlarında B₄C takviyeli kompozitin üretiminde, ıslatılabilirliği arttırmak amacıyla B₄C miktarına eşit oranda K-Al-Ti-F flaksı kullanmıştır. Döküm örneklerinden bazı numuneler

olarak 500 °C katı fazda, 700 °C sıvı fazda 48 saat ısıl işlem uygulanmış kompozitlerin mekaniksel ve mikroyapısal özellikleri incelemiştir. B₄C parçacıklarının ergimiş metalle birleşme esnasında parçacık yüzeylerinde ısıl işlem boyunca kararlı, karmaşık, doğal koruyucu bir Ti-B-C katmanının oluştuğunu görmüştür. Parçacık ilavesinin yüzde artışıyla sertlikte önemli bir artış olduğu ve güçlü bir ara yüzey bağı oluştuğunu belirtmiştir. Katı faz üretiminde mekanik özelliklerde küçük değişiklikler görüldüğünü sıvı faz üretiminde matris ve parçacık arasındaki reaksiyonla birlikte sertliğin arttığı sünekliğin ise azaldığını tespit etmiştir [24].

Soon ve arkadaşları, çalışmalarında %20 SiC takviyeli Al 2014 matrisli kompozitlerin üretiminde sıcak presleme sıcaklığı ve basıncın MMK'in çekme dayanımı ve mikroyapı özelliklerinin üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Yapılan çalışmada sıcak presleme sıcaklığının 570 °C sıcaklığa doğru yoğunlaşmanın yükselmesiyle sıvı fazın yüzde hacim oranının arttığını bildirmişlerdir. Bu artışla birlikte Al 2124 matrisinin yumuşadığı ve kılcal kristallerin deformasyonunun azalarak kompozitin çekme dayanımının hızlı bir şekilde arttığı görülmüştür. Al 2124-SiC kompozitin üretiminde %99 üzerinde yoğunluğa ulaşmak için vakumlu sıcak presleme basıncının 70 MPa'dan daha yüksek olması gerektiği belirlenmiştir. Sıcak presleme esnasındaki basıncın oluşturduğu hasardan dolayı kılcal kristalin en boy oranı azalmış ve 70 MPa'dan daha yüksek basınçların çekme dayanımının artmasına yardımcı olmadığı görülmüştür. Sıcak presleme parametrelerine bağlı olarak kılcal kristallerin en boy oranı ve kompozitin yoğunluğunu birleştirerek, Al2124-SiC kompozitlerin çekme dayanımının tahminde bir denklem önerilmiştir [25].

İpek, çalışmasında sıvı metal ergitme yöntemi ile üretilen 4147 alüminyum matrisli %10, %15 ve %20 oranlarında B₄C ve %20 SiC takviyeli kompozitlerin kuru kayma şartları altında aşınma davranışlarını karşılaştırmıştır. Aşınma testleri pinon disk cihazında 50 N sabit yük 3,6 m/s hızla, 60-180-240-300-360 ve 420 saniye değişen zaman aralıklarında gerçekleştirmiştir. Genel olarak tüm numunelerde aşınma miktarlarının kayma mesafesinin artmasıyla arttığı ve aşınma direncinin takviye

elemanın miktarına bağlı olduğu belirlenmiştir. Benzer şartlar altında en düşük aşınma oranı Al/SiC kompozit alaşımında görülmüş bunun sebebinin de alüminyum alaşımının SiC ıslatma yeteneğinin B₄C'den daha iyi olmasına bağlanmıştır. 4147Al/B₄C kompozitin adhesiv aşınma direncinin B₄C parçacıklarının miktarına bağlı olduğu belirlenmiş ve B₄C parçacık miktarının artması ile aşınma tipinin adhesivden abrasive doğru değiştiği belirtilmiştir. Al/B₄C kompozitin içeriğinin optimum aşınma direnci için Al matrisin plastik deformasyonunu tamamıyla engelleyemediği ifade edilmiştir [26].

Hasırcı ve Gül, çalışmalarında B₄C/Al kompozitlerin abrasiv aşınma davranışlarını incelemişlerdir. Yapılan çalışmada TM yöntemiyle MMK'lerin üretiminde 25 µm ortalama boyuta sahip Al ve B₄C tozları kullanılmıştır. %5, %10 ve %20 oranlarında B₄C takviyeli karışım 2 saat süreyle karıştırılmış 700 MPa basınç altında preslenerek 570 °C sıcaklıkta açık atmosferde 12 saat süreyle sinterlenmiştir. Abrasif aşınma testleri 180 ve 400 mesh Al₂O₃ zımparalar kullanılarak 10 N ve 20 N yüklerde 2 m/s⁻¹ sabit kayma hızında gerçekleştirilmiştir. Mikroyapı incelemelerinde B₄C parçacıklarının homojen bir şekilde dağıldığı görülmüştür. En yüksek sertlik değerine %20 B₄C takviyeli numunede ulaşılmış olmasına rağmen aynı numunede aşınma direncinin azalarak neredeyse saf Al malzeme kadar düştüğü belirlenmiştir. %10 B₄C takviyesinin kompozitin sertliğini %41, aşınma direncini ise %55 geliştirdiği tespit edilmiş; %5 B₄C takviyesinin ise kompozitin sertlik ve aşınma direnci üzerinde ciddi bir etkisi olmadığı görülmüştür. Yük miktarının 10 N'dan 20 N'a çıkartılması durumunda aşınma miktarı oransal olarak 180 mesh zımparada %35, 400 mesh zımparada ise % 47 oranında arttığı tespit edilmiştir [27].

Çanakçı ve Arslan, tarafından Al 2024 matrisli B₄C takviyeli kompozitlerin aşınma davranışlarını takviye elemanın boyutu, hacmi ve kayma zamanı bakımından incelenmiştir. Kompozitin abrasiv aşınma özelliklerinin belirlenmesinde %3, %5, %7 hacim oranlarında ve 29~71 µm boyutlarında B₄C parçacıklar kullanılmıştır. Sıvı metal ergitme yöntemiyle üretilen kompozitler 92 N sabit yük altında 200, 670, 1140, 1610 ve 2080 saniye olmak üzere beş farklı aşınma sürelerinde test edilmiştir. Mikroyapı incelemeleri sonrasında 71 µm parçacık takviyeli kompozitlerde homojen

bir dağılım sağlanırken, 29 µm takviyeli kompozitlerde topaklaşma eğilimi olduğu görülmüştür. Artan parçacık hacmiyle birlikte yoğunluk düşerken, sertlik ve gözenek miktarı ise artmıştır. B₄C parçacık ilavesinin kompozitin aşınma direncini arttırdığı aşınma yüzey incelemeleri sonrasında plastik deformasyonun (mikro çentik ve mikro çiziklerin) ana aşınma mekanizması olduğu belirlenmiştir. B₄C parçacık boyutu ve yüzde hacmindeki artışa bağlı olarak yüzeyde oluşan çiziklerin sayısı ve derinliği azalırken, yüzey kalitesi de nispeten iyileşmiştir. 670 saniyenin üzerindeki aşınma sürelerinde numunenin yüzey pürüzlülüğü hızlı bir şekilde kötüleştiği parçacık boyutu ve yüzde miktarındaki artışa bağlı olarak ise yüzey kalitesinin iyileştiği görülmüştür [28].

2.2. MMK'lerin Üretimi ve Mekanik Özellikleri Üzerine Yapılan Çalışmaların Değerlendirilmesi

Toz metalurjisi yöntemiyle MMK'lerin üretiminde MA, sıcak presleme, sıcak ve soğuk izostatik presleme gibi üretim yöntemleri üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Yapılan araştırmalarda parçacık dağılımı, gözeneklilik gibi mikroyapı özellikleri araştırılmıştır. SP yönteminde basınç ve sürenin MMK'lerin mikroyapısal etkileri araştırılmıştır. Çalışmalar sonrasında B₄C başta olmak üzere birçok takviye elemanın döküm yöntemiyle üretiminde karşılaşılan sorunlar SP ile çözülmüş, homojen ve yüksek yoğunluklu (>%95) MMK'lerin üretimi gerçekleştirilmiştir. Genel olarak üretilen kompozitlerin sertlik, çekme, eğme gibi mekanik özelliklerinin yanı sıra aşınma davranışları da birçok araştırmacı tarafından incelenmiştir. MMK'ler mekanik özellikler bakımından değerlendirildiğinde, kullanılan takviye elemanına bağlı olarak parçacık dağılımının ve ara yüzey bağının mekanik özellikler üzerinde etkin rol oynadığı belirlenmiştir.

Yapılan bu çalışmada ise, B₄C parçacık takviyeli ve B₄C+Gr katkılı kompozitlerin farklı yüzde oranlarında üretimi, kurulan sıcak presleme sistemi ile gerçekleştirilmiştir. Üretilen numunelerin mikroyapı ve mekanik özellikler açısından incelenmiştir. Yapılan ön deneyler sonrasında optimum presleme basıncı, sinterleme sıcaklığı ve süresi belirlenmiş yapılan incelemeler sonrasında yüksek yoğunluklu

(>%97) numuneler üretilmiştir. Ayrıca üretim sonrasında numunelere çökeltme ısıtma işlemi uygulanarak MMK'in mekanik özellikleri arttırılmaya çalışılmış yapılan incelemeler sonrasında ciddi gelişmeler sağlandığı tespit edilmiştir. Literatürde karma takviyeli kompozitlerin bu yöntemle üretimi üzerine kısıtlı çalışma yapıldığı belirlenmiş yapılan bu çalışma ile bu alandaki eksikliklerde giderilmeye çalışılmıştır.

2.3. MMK'lerin İşlenebilirliği ile İlgili Yapılan Çalışmalar

Venkatesh ve arkadaşları, Al matrisli SiC takviyeli MMK malzemenin (1300 kalitede) ÇKE kesici takım ile işlenmesinde takım aşınması, yüzey pürüzlülüğü ve güç tüketimini belirlemeye çalışmışlardır. Yapılan çalışmada ergimiş metal karıştırma yöntemi ile MMK'lerin üretiminde matris malzemesi olarak A 356 alaşımı, takviye elemanı olarak ise 55-80 µm boyutlarında %20 SiC parçacıkları kullanılmıştır. İşlenebilirlik deneyleri (100, 140, 225, 345, 535 m/min) beş farklı kesme hızı, iki farklı (0,018-0,2 mm/rev) ilerleme ve üç farklı (0,25-0,5-0,75 mm) kesme derinliğinde gerçekleştirilmiştir. Kesme hızının artması ile yüzey pürüzlülüğünün iyileştiği görülmüş, bu durum yüksek kesme hızlarında talaşın kolaylıkla kaldırılabilmesine bağlanmıştır. Düşük ilerlemede (0,108 mm/rev) kesme kuvvetlerinin azaldığı belirlenirken yüksek ilerleme (0,368 mm/rev) ve yüksek kesme derinliğinde ise talaş kaldırma işleminde 1300 kalitede ÇKE takım ile tatmin edici sonuçlar alınmıştır. Kesme hızının artması ile yüzey pürüzlülüğünün iyileştiği fakat belirli bir seviyeden sonra artan kesme hızı ile birlikte takım aşınmasına bağlı olarak arttığı tespit edilmiştir [29].

Leng ve arkadaşları tarafından, SiC takviyeli alüminyum matrisli kompozitlere grafit parçacıkları ilavesinin işlenebilirlik ve mekanik özellikleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Matris elemanı olarak 2024 alüminyum alaşımı, takviye elemanı olarak ise ortalama parçacık boyutu 3 µm %40 hacminde SiC parçacıkları ve %3, %5, %6, %7 oranlarında 6 µm boyutlu grafit parçacıkları kullanılmıştır. MMK'lerin üretiminde sıkıştırılmalı döküm yöntemi kullanılmıştır. İşlenebilirlik deneyleri K10 kalitede kesici uç kullanılarak 30 m/min kesme hızı, 0,1 mm/rev ilerleme, 0,15 mm sabit kesme derinliğinde gerçekleştirilmiştir. Maksimum takım aşınması miktarı 0,6

mm olarak belirlenmiş ve çalışma sonucunda işleme zamanının artışı ile takım aşınmasının arttığı görülmüştür. SiC/Al kompozitlere %3~7 arasında grafit parçacıklarının takviyesinin takım ömrünü %10~130 oranında arttırdığı belirlenmiştir. SiC/Gr/Al kompozitin içerisindeki grafit parçacıklarının artışı ile takım aşınması azalmış ve tüm kompozitler içerisinde en az takım aşınması %7 grafit takviyeli numunede gerçekleşmiştir. SiC ve Al elastikiyet modülünün yüksek olduğu, fakat ilave edilen grafit miktarının artışı ile mekanik özelliklerin olumsuz yönde etkilendiği belirtilmiştir. Grafit ilavesi sonrasında elastikiyet modülünün 172 GPa'dan 144 GPa düştüğü, benzer şekilde 365 MPa olan çekme dayanımının da %3~7 grafit ilavesi sonrasında %19~28 oranında azaldığı görülmüştür [30].

Çifçi ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada, sıvı metal ergitme yöntemiyle ürettikleri %16 SiC takviyeli kompozitlerin KBN kesicilerle işlenmesinde parçacık boyutu ve kesme parametrelerinin takım aşınması üzerindeki etkileri araştırılmıştır. MMK'lerin üretiminde 30, 45 ve 110 µm olmak üzere üç farklı parçacık boyutu kullanılmıştır. Kompozitlerin üretimi argon gazı atmosferi altında ısıtma fırınlı grafit potada gerçekleştirilmiştir. İlk olarak fırın sıcaklığı 725 °C'ye çıkartılarak matris malzemenin tamamı ergiyene kadar sabit tutulmuş, daha sonra parçacıkların birbirleriyle kaynaşmasını kolaylaştırmak amacıyla sıcaklığı 675 °C'ye düşürülmüştür. Grafit pervane çalıştırılarak yüzey oksitleri oluşturmak için 2 saat boyunca 1000 °C'de ön ısıtma işlemi tabii tutulan SiC parçacıkları düzenli olarak eklenmiştir. Islatılabilirliği arttırmak amacıyla %0,5 oranında Mg ilave edilmiştir. Bu esnada karışımın akışkanlığını arttırmak amacıyla sıcaklık aşamalı olarak 725 °C'ye kadar yükseltilmiş, parçacık eklemesi tamamlandıktan sonra 5 dakika daha karıştırma işlemine devam edilmiştir. Karıştırma işlemi tamamlandıktan sonra ergimiş karışım ön ısıtma işlemi uygulanmış kalıba alınarak hidrolik preste tamamen katılaşıncaya kadar 40 MPa basınç altında preslenmiştir. MMK'lerin işlenebilirlik deneyleri 0,12 mm/rev ilerleme ve 1 mm sabit kesme derinliğinde 50~200 m/min aralığında farklı kesme hızlarında KBN kesici takımlarla gerçekleştirilmiştir. Takım aşınmasında takviye elemanı parçacık boyutunun etkili olduğu ve etkin aşınma tipinin yanak aşınması olduğu görülmüştür. 35 ve 45 µm boyutlarında SiC parçacıkları içeren MMK'lerin işlenmesinde KBN kesici takımında yoğun olarak

yanak aşınması görülmüş, abrasiv ve adhasiv aşınma mekanizmalarının etkili olduğunu belirlenmiştir. Diğer yandan 110 µm boyutlarında SiC parçacıkları içeren MMK'lerin işlenmesinde kesici kenar ve köşe kırılmalarının her ikisine de rastlanmıştır. 110 µm boyutlarındaki SiC parçacık takviyeli kompozitlerin işlenmesinde yüksek takım aşınmasından dolayı KBN takımların kullanılmasının uygun olmadığı belirtilmiştir. 30 ve 45 µm SiC parçacıklarla takviyelendirilmiş kompozitlerde en düşük yan yüzey kenar aşınmasına 150 m/min kesme hızında, en yüksek takım aşınmasına ise 100 ve 200 m/min kesme hızlarında ulaşılmıştır [31].

Chou ve Liu, çalışmalarında metal matrisli kompozitlerin yüksek dayanım-hafiflik oranı sebebiyle endüstride geniş bir uygulama alanına sahip olduğunu ancak yapısındaki takviye elemanının doğal aşındırıcı özelliğinden dolayı işlenebilirliklerinin zor olduğunu belirtmişlerdir. MMK'lerin işlenmesinde hızlı takım aşınmasından dolayı yalnızca elmas kaplı takımlarla işlenmesinin uygun olduğunu, fakat elmas takımlarında ekonomik olmadığına işaret etmişlerdir. Yapılan çalışmada alüminyum alaşımli, silisyum parçacık takviyeli MMK'lerin işlenmesinde 30 µm kaplama yapılmış tungsten karbür uçlar kullanılmıştır. İşlenebilirlik deneyleri 1-6 m/min kesme hızı, 0,05-0,3 mm/rev ilerleme ve 1-2 mm kesme derinliğinde gerçekleştirilerek, takım aşınmaları ölçülmüş ve körelen takımlar SEM görüntüleri yardımıyla kapsamlı olarak incelenmiştir. Kesme kuvvetleri, talaş kalınlığı ve takım talaş temas alanındaki kesme sıcaklığı için sonlu elemanlar analizi kullanılmıştır. Kesme hızını ve ilerlemenin takım aşınması üzerinde etkili olduğu ve baskın aşınma mekanizmasının da kaplamanın kalkması olarak belirtilmiştir. Yüksek gerilmeler sonucunda yüzey ve kaplama arasında kesme sıcaklığının yükselmesinden dolayı oluşan farklı ısıl genleşmelerin ve yığıntı talaşın kaplamanın kalkmasına sebep olacağı belirtilmiştir [32].

Ding ve arkadaşları tarafından, alüminyum alaşımli SiC takviyeli metal matrisli kompozitlerin çok kristalli bor nitrürlü (ÇKBN) ve ÇKE kesicilerle işlenmesinde takım performansları incelenmiştir. İşlenebilirlik deneyleri (0,3 mm) sabit kesme derinliği, (0,1 mm/rev) ilerleme ve 50 ve 400 m/min kesme hızlarında ıslak ve kuru kesme şartları altında gerçekleştirilmiştir. Takımlarda oluşan yanak ve çentik

aşınması ölçülerek yüzey pürüzlülüğü değerlendirilmiştir. ÇKE takımların sahip oldukları yüksek aşınma dayanımı ve iş parçası malzemesine karşı düşük yapışma eğilimlerinden dolayı ÇKBN takımlardan daha iyi performans sağladığı görülmüştür. Kesme hızının artması ile yanak aşınması önemli ölçüde artmıştır. Yanak aşınmasındaki artış takım yanak yüzeyi ve iş parçası temas alanını arttırmış bunun sonucunda çentik aşınmasının arttığı görülmüştür. ÇKE takımların yüksek çentik aşınma dayanımı sergilediği belirlenmiştir. Yüksek kesme hızlarında, yüzey pürüzlülüğü üzerinde yapışmanın etkin olduğu görülmüştür. 50 m/min kesme hızında soğutma sıvısının kullanımı ile yüzey pürüzlülüğü önemli ölçüde artarken, 400 m/min kesme hızında ise soğutma sıvısının kullanımı ile iyileşmiştir. MMK'lerin ÇKE takımlarla yüksek ve düşük kesme hızlarında işlenmesinde soğutma sıvısının faydalı olmadığı tespit edilmiştir [33].

Çifçi ve arkadaşları diğer bir çalışmada, ergimiş metal karıştırma ve basınçlı döküm yöntemiyle üretilen MMK'in kesme parametrelerine bağlı olarak kaplamalı ve kaplamasız SK kesicilerle işlenmesinde parçacık boyutu ve miktarının takım aşınması üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Yapılan çalışmada ağırlıkça %8 ve %16 olmak üzere iki farklı oranda ve 35, 45, 110 µm boyutlarında olmak üzere SiC parçacıklar kullanılmıştır. İşlenebilirlik deneyleri 0,12 mm/rev ilerleme ve 1 mm sabit kesme derinliğinde (20, 40, 60 ve 80 m/min) kesme hızlarında kaplamasız ve üç katlı kaplamalı takımlarla gerçekleştirilmiştir. Aşınma deneyleri 35 ve 45 µm parçacık boyutlarındaki numune için 1250 mm³, 110 µm parçacık boyutu için ise yüksek takım aşınmasından dolayı 625 mm³ sabit talaş hacminde gerçekleştirilmiştir. Kaplama ve kesme hızının takım aşınması ve yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkileri incelenmiştir. Takviye elemanı parçacık boyutu ve takviye elemanının yüzde oranı ile birlikte kesme hızının takım aşınması üzerinde ana faktör olduğu ve tüm malzemelerin işlenmesinde takım aşınması bakımından kaplamalı karbür kesicinin kaplamasız takıma oranla daha iyi performans sergilediği görülmüştür. Özellikle düşük kesme hızlarında kaplamasız kesici takımın yüzey pürüzlülüğü bakımından daha iyi performans gösterdiği fakat yüksek kesme hızlarında yüzey kalitesinin kötüleştiği görülmüş bu durumun yüksek kesme hızlarında kesici takımda oluşan aşınmadan kaynaklandığı belirtilmiştir [34].

Manna ve Bhattacharayya tarafından yapılan çalışmada, SiC parçacık takviyeli Al matrisli MMK'lerin kaplamasız SK takımlarla işlenmesinde kesme parametrelerinin kesme kuvvetleri ve takım aşınması üzerindeki etkileri araştırılmıştır. İşlenebilirlik deneyleri (20-40-60-100-150-180-225 m/min) kesme hızı, (0,14-0,25-0,33-0,5-0,75-1 mm/rev) ilerleme, (0,25-0,5-0,75-1-1,25-1,5 mm) kesme derinliğinde gerçekleştirilmiştir. Al/SiC kompozitin düşük kesme hızlarında işlenmesinde yüksek kesme kuvvetleri ve yığıntı talaş oluşumundan dolayı kesici takımın yanak aşınmasının arttığı görülmüştür. Ayrıca MMK'lerin yüksek kesme hızlarında işlenmesinde oluşan yüksek sıcaklıklar sebebiyle kesici takımın ucundaki deformasyonun hızlı takım aşınmasına sebep olduğu belirtilmiştir. Kesme hızı, ilerleme, kesme derinliğinin yüzey pürüzlülüğü üzerinde eşit etkili olduğu, MMK'lerin işlenmesinde en iyi yüzey kalitesine yüksek kesme hızı, düşük ilerleme ve düşük kesme derinliğinde ulaşılabileceği tespit edilmiştir [35].

Özben ve arkadaşları, çalışmalarında takviye elemanının yüzde hacminin MMK'lerin işlenebilirliği ve mekanik özellikleri üzerindeki etkisini incelemiştir. Yapılan çalışmada Al matrisli %5, %10 ve %15 oranlarında SiC takviyeli kompozitler kullanılmıştır. İşlenebilirlik deneylerini TiN kaplı karbür uçlarla kuru kesme şartları altında gerçekleştirilerek kesme hızı, ilerleme ve kesme derinliğinin takım aşınması ve yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkileri araştırılmıştır. MMK'lerin işlenmesinde yüksek SiC takviyesinin takım aşınmasını arttırdığı, kesme hızı ve ilerlemenin ise yüzey pürüzlülüğü üzerinde etkili olduğu belirlenmiştir. Takviye elemanı oranının artması ile kompozitin gerilme dayanımı, sertlik ve yoğunluğunun artarken, çekme dayanımı ise azalmıştır. Takım aşınması üzerinde ilerlemenin kesme hızı kadar etkili olmadığı fakat ilerlemenin artmasıyla takım aşınmasının da arttığı gözlenmiştir. Al₃Si₇Mg₂ MMK'lerin tornalanmasında kesme hızının azalmasıyla yüzey pürüzlülüğünün iyileştiği, ilerlemenin artmasıyla birlikte ise kötüleştiği görülmüştür [36].

Turgut ve arkadaşları, tarafından yapılan çalışmada Al/SiC kompozitlerin frezelenmesinde kesme parametreleri ve kesici tipinin kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkileri araştırılmıştır. TM yöntemiyle üretilen numunelerde

matris elemanı olarak alüminyum, takviye elemanı olarak 10 µm altı %7 Si ve 8 µm altı %5 SiC parçacıklar kullanılmıştır. İşlenebilirlik deneyleri dört farklı kesme hızı (300, 350, 400 ve 450 m/min), üç farklı ilerleme (0,1-0,15-0,2 m/rev) ve iki farklı kesme derinliğinde (0,5-1 mm) kaplamasız ve TiCN+TiN kaplı SK kesiciler kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kaplamalı ve kaplamasız kesiciler için artan ilerleme ve kesme derinliğiyle birlikte esas kesme kuvvetinin arttığı, yüksek kesme hızlarında ise azaldığı görülmüştür. Diğer yandan MMK'in işlenmesi esnasında ilerleme ve kesme derinliğinin artmasıyla kaplamasız kesicide yüzey pürüzlülüğünün kötüleştiğini fakat benzer şartlar altında kaplamalı SK kesicilerde ise iyileştiği tespit edilmiştir [37].

Muthukrishnan ve arkadaşları, sıvı metal ergitme yöntemi ile ürettikleri A 356-%10 SiC kompozitlerin 1500 kalitede ÇKE takımla tornalanmasında takım aşınması, güç kullanımı ve yüzey pürüzlülüğünü incelemiştir. Yapılan çalışmada MMK'lerin üretiminde, 650 °C ön ısıtmaya tabi tutulmuş 54-182 µm parçacık boyutunda SiC tozları kullanılmıştır. MMK'lerin üretiminde matris alaşım ergitildikten sonra mekanik bir karıştırıcı yardımıyla 7 dakika boyunca karıştırılarak sürekli olarak SiC parçacıklar eklenmiş ve ıslatılabilirliği iyileştirmek içinde magnezyum ilave edilmiştir. Ergimiş metal ön ısıtma uygulanmış kalıba alınarak 50 mm çapında, 175 mm boyunda numuneler üretilmiştir. İşlenebilirlik deneyleri 0,075 mm/rev ilerleme hızı, 0,5 mm sabit kesme derinliği ve 200, 300, 400 m/min kesme hızlarında gerçekleştirilmiştir. Takım aşınması, güç kullanımı, takım ömrü ve yüzey pürüzlülüğü ölçülmüştür. Takım aşınmasıyla birlikte güç kullanımında artış görülmüş SiC parçacıkların takımın birinci ve ikinci serbest yüzeylerinde aşınmaya sebep olduğu belirlenmiştir. Artan kesme hızıyla birlikte yüzey kalitesinin iyileştiği belirlenirken bu durum SiC parçacıkların matris elemanından ayrılmasının kolaylaşmasına bağlanmıştır [38].

Muthukrishnan ve arkadaşları, tarafından yapılan başka bir çalışmada %15 SiC takviyeli MMK'lerin üç farklı kalitede (1300-1500-1600) ÇKE takımla işlenebilirliği araştırılmıştır. İşlenebilirlik deneyleri (12-24-36-48-60 m/min) kesme hızları, (0,108-0,200-0,368 mm/rev) ilerleme ve (0,5 ve 0,75 mm) olmak üzere iki farklı kesme

derinliğinde gerçekleştirilmiştir. Yüzey pürüzlülüğü, güç kullanımı ve kaldırılan talaş miktarlarına bağlı olarak takım aşınmaları incelenmiştir. Tüm kesme şartları ve takım kaliteleri için en iyi yüzey kalitesine yüksek kesme hızı, düşük ilerleme değerlerinde ulaşılmıştır. Deneyleerde elde edilen yüzey pürüzlülüğü teorik olarak hesaplanan yüzey pürüzlülük değerinden çok daha yüksek çıkmıştır. İşlenebilirlik deneylerinde en iyi yüzey kalitesine 1600 kalite kesicide ulaşılmış, onu 1500 kalitedeki kesici takip etmiştir. SEM incelemeleri sonucunda kesici takımlarda YT oluştuğu gözlenmiş, aynı zamanda yanak ve krater aşınmasının da başladığı tespit edilmiştir [39].

Acır ve arkadaşları, Al-4Cu/B₄C MMK'in işlenmesinde, kesici takım kaplamasının takım aşınması üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Yapılan çalışmada Al-4Cu matrisli %20-%80 B₄C takviyeli kompozitlerin üretiminde alüminyum, bakır ve bor karbür ortalama toz boyutları sırasıyla 37 µm, 33 µm ve 16 µm olarak belirlenmiştir. Karışım tozlarını 50 MPa basınç altında soğuk olarak sıkıştırılmış, devamında 585 °C sıcaklıkta 25 MPa basınç altında 10 dakika süreyle sıcak olarak preslenmiştir. İşlenebilirlik deneyleri beş farklı kesme hızı (100, 130, 169, 220, 286 m/min), 0,20 mm/rev ilerleme ve 1,5 mm sabit kesme derinliğinde çok katlı (TiN/TiAlN) kaplamalı SK ve kaplamasız SK kesici takımlar kullanılarak kuru kesme şartlarında gerçekleştirilmiştir. Kesici takım yanak aşınması sınır değeri $V_f=0,3$ mm olarak belirlenmiş ve frezeleme işleminden sonra kaplamalı ve kaplamasız takımlarda oluşan yanak aşınmaları ölçülmüştür. Artan kesme hızına bağlı olarak yanak aşınmasının arttığı, TiN/TiAlN çok katlı takımın kaplamasız takıma göre daha iyi performans sergilediği görülmüştür. Ayrıca kompozit malzemelerin işlenmesinde geleneksel malzemelere göre takım aşınmasının daha kısa sürede gerçekleştiğinden dolayı ekonomiklik açısından kaplamalı kesici takımların bu tür malzemelerin işlenmesinde daha faydalı olacağı bildirilmiştir [40].

Zhang ve arkadaşları, tarafından silisyum ve silisyum karbür takviyeli MMK'lerin SK takımlarla frezelenmesi araştırılmıştır. Kompozitin işlenmesinde takviye elemanlarının etkisinin belirlenmesi amacıyla hacimce %4, %9 ve %13 oranlarında 10–60 µm boyutlarında SiC ve aynı yüzde hacim oranlarında Si parçacıklar kullanılmıştır. MMK'in işlenmesinde kesme kuvvetleri, takım aşınması ve yüzey

pürüzlülüğü araştırılmıştır. SiC parçacık miktarının artmasıyla takım aşınmasının arttığı, Si parçacıklarından dolayı MMK'lerin işlenmesinde yüzeyde çatlak ve çukur olduğu belirtilmiştir. Al/Si/SiC içindeki SiC parçacıklarının yüzde oranının artması ile MMK'lerin eğilme dayanımı ve sertliklerinde de artış gözlenmiştir [41].

Kılıçkap ve arkadaşları, sahip oldukları mükemmel mühendislik özellikleri sebebiyle parçacık takviyeli MMK'lere duyulan ilginin giderek arttığını yinelemiştir. Takviye elemanının (SiC) aşındırıcı ve sertlik özellikleri nedeniyle işlenmelerinin güç olduklarını belirtmişlerdir. Yapılan çalışmada 24 µm ortalama parçacık boyutlu, %5 SiC takviyeli kompozitlerin işlenmesinde takım aşınması ve yüzey pürüzlülüğü araştırılmıştır. İşlenebilirlik deneyleri 50, 100 ve 150 m/min kesme hızı, 0,1-0,2-0,3 mm/rev ilerleme ve (0,5-1-1,5 mm) kesme derinliğinde kuru kesme şartları altında, K10 kalitede kaplamasız ve TiN kaplı kesici takımlarla gerçekleştirilmiştir. Kesici takımlarda yanak aşınması görülmüş fakat YT oluşumuna rastlanmamıştır. Kesme hızının takım aşınması üzerinde çok etkili olduğu, 150 m/min kesme hızının 50 m/min'e kıyasla iki katı bir aşınmaya neden olduğu tespit edilmiştir. Yüksek kesme hızlarında yüzey pürüzlülüğünün iyileştiği, artan ilerleme değerlerine bağlı olarak ise kötüleştiği gözlenmiştir. Aşınma direnci bakımından kaplamalı takımın kaplamasız takıma kıyasla daha iyi performans sergilediği belirtilmiştir [42].

Seman ve arkadaşları tarafından, parçacık takviyeli MMK'lerin mükemmel mühendislik özelliklerinden dolayı kompozit malzemeler arasında, büyük ilgi gördükleri belirtilmiştir. Karıştırmalı döküm yöntemiyle üretilen %20 SiC takviyeli MMK'lerin işlenmesinde kesme hızı, ilerleme, kesme derinliği ve işleme zamanının yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınması üzerindeki etkileri geliştirilen model ile yorumlanmaya çalışılmıştır. Geliştirilen regrasyon modeliyle kesme hızı ve ilerlemenin diğer kesme parametreleri karşısında çok daha etkili olduğu belirlenmiştir. Sementit karbür kesicilerde YT oluşumunun takım aşınması üzerinde etkili olduğu görülmüş, takımların yüzey morfoloji incelemeleri sonrasında abrasiv ve adhesiv aşınma mekanizmalarının ana aşınma mekanizması olduğu belirtilmiştir. Düşük ilerleme değerlerinde YT talaş oluşumunun yüzey pürüzlülüğü üzerinde etkili olduğu, yüksek kesme hızı ve düşük ilerleme değerlerinde ise yüzey pürüzlülüğünün

azaldığı, kesme derinliğinin artmasıyla birlikte yüzey pürüzlülüğünün arttığı görülmüştür [43].

Şahin ve Sur, tarafından yapılan çalışmada sıvı metal ergitme yöntemiyle üretilen %10 SiC takviyeli MMK'in farklı kesme şartlarında işlenmesinde, Al₂O₃, TiN ve Ti (C, N) esaslı CVD kaplamaların takım aşınması üzerindeki etkileri araştırılmıştır. MMK'in üretiminde matris elemanı olarak 2014Al alaşımı, takviye elemanı olarak ise 29 ve 110 µm ortalama parçacık boyutlarında SiC parçacıklar kullanılmıştır. Kompozitlerin üretimi elektrikli metal ergitme fırını içerisindeki grafit potada argon gazı koruyucu atmosferinde gerçekleştirilmiştir. Fırın içerisine Al2014 alaşımı alınarak sıcaklık 500 °C'ye ulaşınca grafit pervane pota içerisine alınmıştır. Alüminyum folyo içerisine sarılan 6 gr ağırlığındaki SiC parçacıklar paketler halinde vortex oluşumundan 20 s sonra ilave edilmiştir. Parçacık ilavesi tamamlandıktan sonra ergimiş metal ön ısıtma işlemi uygulanan dökme demirden yapılmış kalıba alınarak MMK'lerin üretimleri başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Tornalama deneyleri sabit ilerleme ve kesme derinliğinde kuru kesme şartları altında gerçekleştirilmiştir. En alt katmanda TiC, üzerinde Al₂O₃ ve en üst katmanda TiN kaplamalı A kodlu kesici ve TiC kaplamasının üzerinde Al₂O₃ kaplı, B kodlu kesici olmak üzere farklı talaş kırıcı geometrisine sahip iki farklı kesici takım kullanılmıştır. MMK'lerin işlenmesinde takım A'nın B'den daha iyi performans sergilediği, kesme hızı ve parçacık boyutunun artması ile takım ömrünün önemli ölçüde azaldığı gözlenmiştir. Farklı parçacık boyutuna sahip kompozitlerin işlenmesinde TiN kaplamalı takımın aşınma performansının Al₂O₃ takımdan oldukça düşük olduğu belirtilmiştir. Kesici takımlarda görülen ana aşınma mekanizmasının abrasiv aşınma olduğu, tüm kesme şartları için kesme hızının artması ile takım ömrünün azaldığı belirlenmiştir. 110 µm parçacık takviyeli kompozitlerin A takım ile işlenmesinde düşük kesme hızı, 29 µm taneli kompozitlerin işlenmesinde yüksek kesme hızları önerilmiştir [44].

Basavarajappa çalışmasında, Al2219/SiC ve Al2219/SiC-Gr karma kompozitlerin farklı kesme şartları altında kaplamalı, kaplamasız SK ve ÇKE takımlarla işlenmesinde grafit ilavesinin takım aşınması üzerindeki etkilerini araştırmıştır.

Yaptığı çalışmada ergimiş metal karıştırılmalı döküm yöntemi ile ortalama parçacık boyutu 25 µm, %15 SiC takviyeli ve %15 SiC ile 45 µm boyutlu %3 grafit katkılı kompozitlerin üretimi gerçekleştirilmiştir. Grafitin sahip olduğu doğal yağlayıcı özelliğinden dolayı takım talaş ara yüzeyi ve iş parçası takım arasındaki sürtünme katsayısını düşürerek tüm kesme şartlarında takım aşınmasını azalttığı bildirilmiştir. Ayrıca kesme hızı ve ilerlemenin artışıyla birlikte kesme bölgesinde oluşan yüksek sıcaklıkların takım aşınmasını arttırdığı belirtilmiştir. ÇKE takım sahip olduğu üstün özellikler nedeniyle MMK'lerin işlenmesinde en iyi performansı göstermiştir [45].

Bhushan ve arkadaşları çalışmalarında, %10 SiC parçacık takviyeli 7075 Al matrisli MMK'in işlenmesinde kesme hızı, kesme derinliği, ilerlemenin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Yapılan çalışmada işlenebilirlik deneyleri SK ve ÇKE kesiciler kullanılarak dört farklı kesme hızı (180, 200, 220 ve 240 m/min), 0,1-0,2-0,3 ve 0,4 mm/rev ilerleme ve 0,5-1,0-1,5-2,0 mm kesme derinliğinde gerçekleştirilmiştir. 180–200 m/min kesme hızında adhesiv aşınma mekanizmasının etkin olduğu, MMK'lerin işlenmesinde ÇKE takımında daha az aşınma gerçekleştiği ve SK kesicilere göre daha iyi yüzey kalitesi sağladığı görülmüştür. Karbür kesici takımla MMK'lerin işlenmesinde en iyi yüzey pürüzlülüğü 180 m/min ve 220 m/min kesme hızında sağlanmıştır. Minimum takım aşınmasına 200 m/min kesme hızı, 0,1 mm/rev ilerleme ve 0,5 mm kesme derinliğinde ulaşılmıştır [46].

Karakaş ve arkadaşları, çalışmalarında sıcak presleme yöntemiyle ürettikleri Al-4Cu/B₄C kompozitin farklı kesicilerle frezelenmesinde kesme hızının takım performansları üzerindeki etkilerini ve aşınma davranışlarını incelemişlerdir. Yapılan çalışmada işlenebilirlik deneyleri 0,2 mm/rev sabit ilerleme ve 1,5 mm kesme derinliğinde beş farklı kesme hızında (100, 130, 169, 220 ve 286 m/min) kuru kesme şartlarında gerçekleştirilmiştir. Kesme hızı %30 artırılarak kesme hızının takım aşınması üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Takım performanslarının değerlendirilmesinde yanak aşınması kriter olarak belirlenmiş, ISO 3685'e göre yanak aşınması $V_b=0,3$ mm ile sınırlandırılmıştır. Deneylerde A kodlu kaplamasız SK, B kodlu üç katlı (TiCN+Al₂O₃+TiN) kaplamalı SK ve C kodlu olmak üzere çift katlı (TiN+TiAlN) kaplamalı SK kesiciler kullanılmıştır. A, B ve C kodlu takımlarla

kaldırılan talaş miktarları sırasıyla 100 m/min kesme hızı için 3750, 8000 ve 600 mm³, 286 m/min kesme hızı için ise sırasıyla 3000, 6000 ve 3000 mm³ olarak gerçekleştirilmiştir. Tüm takımlar için kesme hızının artması ile takım aşınmasının arttığı belirtilmiştir. Kesicilerde takım ile iş parçası arasındaki sürtünmeden dolayı abrasiv aşınma mekanizmasının baskın olmak üzere adhesiv ve kimyasal aşınma mekanizmalarının olduğu gözlenmiştir. Takımlar arasında tüm kesme hızlarında en iyi aşınma direncini B kodlu takımın sergilediği görülmüş, bu durum takımdaki üç katlı kaplamaya bağlanmıştır. C kodlu takımın düşük kesme hızlarında A'dan daha iyi, 169, 220 ve 286 m/min kesme hızlarında ise takımların birbirlerine yakın performans sergiledikleri tespit edilmiştir. Tüm kesici takımlarda kesme hızına bağlı YT oluşumunun büyüklüğü 100-500 µm arasında değiştiği kesme hızının YT oluşumunun büyüklüğü ile doğrudan etkili olduğu belirtilmiştir. Yüksek kesme hızları sonucunda artan sıcaklıklar sert takım malzemesinin yumuşamasına sebep olduğu vurgulanmış, kesme hızının artması ile YT oluşumunda önemli bir azalma gözlenmiştir. Düşük kesme hızlarında kesme bölgesindeki sıcaklık düşüşünün alüminyumun gerilim sertleşmesine neden olduğu ve malzemedeki talaş kaldırmanın zorlaştığı belirtilmiştir [47].

Kök çalışmasında, 2024Al/Al₂O₃ MMK'lerin farklı kesme şartları altında K10 kalitede TiN kaplamalı ve kaplamasız SK takımlarla tornalanmasında takım ömrü, takım aşınması ve yüzey pürüzlülüğünü araştırmıştır. Kesme hızının artması ile her iki takım için takım ömrünün azaldığı, TiN kaplı takımın ömrünün kaplamasız takımdan daha uzun olduğunu belirlemiştir. Yanak aşınmasının ana aşınma mekanizması olduğunu belirtilmiş ve optimum yüzey pürüzlülüğüne 160 mm/rev kesme hızında ulaşıldığını bildirilmiştir [48].

Übeyli ve arkadaşları, alüminyum oksit takviyeli Al-6Zn-2Mg-2Cu kompozitlerin frezelenmesinde kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülüğünü araştırmışlardır. Yapılan çalışmada kompozitin üretiminde alüminyum, zirkonyum, magnezyum, bakır ve alüminyum oksit olmak üzere sırasıyla 14, 17, 45, 39 ve 43 µm ortalama parçacık boyutlarında tozlar kullanılmıştır. Sıcak presleme yöntemiyle kompozitin üretiminde ana faz malzemesi Al-6Zn-2Mg-2Cu, takviye fazı olarak ise %15 oranında Al₂O₃

kullanılmıştır. İşlenebilirlik deneyleri 90, 120 ve 150 m/min kesme hızı, 0,08–0,12 ve 0,16 mm/rev ilerleme hızı ve 1 mm sabit kesme derinliğinde kuru kesme şartları altında gerçekleştirilmiştir. Kaplamasız SK, TiN kaplı SK ve TiCN kaplı Al_2O_3 seramik olmak üzere üç farklı kesici takım kullanılmıştır. İlerlemenin artması ile kesme kuvvetlerinin arttığı görülmüş, en düşük kesme kuvvetlerine kaplamasız ve TiN kaplı kesiciler ile ulaşılmıştır. Yüksek kesme kuvvetlerine TiCN kaplı seramik takımla ulaşılması, kesici kenar geometrilerindeki farka bağlanmıştır. Kesme hızının kesme kuvvetleri üzerinde önemli bir etkisinin olmadığı, ilerlemenin artması ile de yüzey pürüzlülüğünün arttığı belirlenmiştir. Kaplamasız takımda YT oluşumunun kaplamalı SK ve seramik takıma nazaran çok daha az olduğu belirlenmiş bu durum talaş-takım arasında oluşan yüksek sürtünmeden kaynaklanan ısının malzemeyi yumuşatmasına bağlanmıştır [49].

Übeyli ve arkadaşları tarafından yapılan bir başka çalışmada sıcak presleme yöntemiyle üretilen AI-%4Cu/ B_4C kompozitlerin frezelenmesinde kaplamanın yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Yapılan çalışmada, B_4C takviyeli AI-%4Cu kompozitlerin üretiminde ortalama parçacık boyutları 37, 33 ve 16 μm olan sırasıyla alüminyum, bakır ve bor karbür tozları kullanılmıştır. Karışım tozları %20 B_4C takviyesiyle birlikte 50 MPa basınç altında soğuk olarak preslenmiş daha sonra 585 °C'de 25 MPa basınçta koruyucu nitrojen atmosferi altında 10 dakika süreyle sıcak preslenmiştir. İşlenebilirlik deneyleri dört farklı (100, 130, 169 ve 200 m/min) kesme hızı, üç farklı (0,15-0,20-0,25 mm/rev) ilerleme ve 1,5 mm sabit kesme derinliğinde gerçekleştirilmiştir. Deneylerde kaplamasız, çift katlı (TiN+TiAlN) ve üç katlı (TiCN+ Al_2O_3 +TiN) kaplamalı SK kesici takımlar kullanılmıştır. Kesme hızı ve ilerlemenin yüzey pürüzlülüğü üzerinde etkili parametre olduğu belirlenmiştir. Kesme hızının artması ile genel olarak yüzey pürüzlülüğünün azaldığı görülmüş bu durum kesme bölgesinde oluşan yüksek sıcaklıklar nedeniyle YT oluşumunun azalmasına bağlanmıştır. Düşük kesme hızlarında ilerlemenin artışı ile yüzey pürüzlülüğünde belirgin bir değişim görülmezken yüksek kesme hızlarında ilerlemenin artması ile yüzey pürüzlülüğünün aşamalı olarak arttığı bildirilmiştir [50].

Acır ve arkadaşları, bor karbür takviyeli alüminyum matrisli kompozitlerin frezelenmesinde kesme kuvvetlerini incelemiştir. Yapılan çalışmada MMK'ler sıcak presleme yöntemiyle koruyucu atmosfer altında, 585 °C sıcaklıkta 10 dakika 25 MPa basınç uygulanarak üretilmiştir. Deneylerde kaplamasız ve TiAlN kaplı SK olmak üzere iki farklı kesici kullanılmıştır. Kesme kuvvetleri üzerinde en etkili parametrenin ilerleme olduğu, ilerlemenin artması ile kesme kuvvetlerinin hızlı bir şekilde arttığı belirtilmiştir. Kesme hızının kesme kuvvetleri üzerinde belirgin bir etkisinin olmadığı görülmüştür. Kesme kuvvetleri bakımından kaplamalı ve kaplamasız takımların düşük kesme hızı ve ilerleme hızlarında benzer sonuçlar sergiledikleri belirlenmiştir [51].

2.4. MMK'lerin İşlenebilirliği ile İlgili Yapılan Çalışmaların Değerlendirilmesi

MMK malzemeler üretildikten sonra, çalışma yerlerine uygun boyut ve toleranslarda son şeklinin verilmesi için birtakım talaşlı imalat süreçlerine gereksinim duyulmaktadır. Bundan dolayı MMK malzemelerin işlenebilirliği üzerine SK, KBN ve ÇKE kesiciler kullanılarak bir çok araştırma yapılmıştır. Bu çalışmalarda kesme parametreleri, kesici kalitesi ve tipinin, kesme kuvvetleri, takım aşınması ve yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Araştırmacılar, genel olarak kesme hızının artması ile yüzey pürüzlülüğünün iyileştiğini, kesme kuvvetlerinin düştüğünü fakat belirli bir seviyeden sonra artan kesme hızı ile birlikte yüzey pürüzlülüğünde bozulma olduğunu ve takım aşınmasının arttığını belirtmişlerdir. Kesici takımlarda abrasiv ve adhesiv aşınma mekanizmalarının etkili olduğunu bildirmişlerdir. Genellikle parçacık takviyeli kompozitlerin işlenmesinde SK ve KBN kesicilerin kaba talaş işlemlerinde, ÇKE kesicilerin ise ince talaş işlemlerinde tercih edildiği görülmüştür.

Yapılan birçok çalışma tek takviye elemanlı kompozitlerin üretimi üzerinde odaklanmıştır. MMK'lerin mekanik özelliklerinin artırılması amacıyla karma takviyeli kompozitler üretilmişse de işlenebilirliği iyileştirmek için Gr gibi takviye elemanlarının kullanımı üzerine yapılmış çalışma sayısı kısıtlıdır. Genel olarak MMK'lerin işlenmesinde ÇKE en iyi çözüm gibi görülse de gerek ekonomiklik

gerekse üretilen MMK'lerin yapısındaki Gr varlığı ÇKE'ın kullanımını kısıtlamaktadır. Sementit karbür kesicilerin düşük maliyetleri sebebiyle tercih edilmiş, fakat B₄C takviye elemanının yüksek sertliği nedeniyle KBN kesicilerde kullanılmıştır.

Yapılan çalışmada B₄C parçacık takviyeli ve B₄C+Gr katkıli kompozitler üretilerek SK ve KBN kesiciler kullanılarak işlenebilirlik deneyleri gerçekleştirilmiştir. İşlenebilirlik deneylerinde dört farklı kesme hızı (50, 65, 85 ve 110 m/min), 0,11 mm/rev sabit ilerleme ve 0,5 mm kesme derinliğinde kuru kesme şartlarında gerçekleştirilmiştir. İşlenebilirlik deneyleri, takım aşınması, kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülüğü açısından değerlendirilmiş, kesme parametreleri ve malzemenin mikroyapısının işlenebilirlik üzerindeki etkileri ortaya konulmaya çalışılmıştır.

3. KOMPOZİT MALZEMELER

İnsanoğlu, çok eski çağlarda da farklı malzeme bileşenlerinin kombinasyonu ile, bu ayrı bileşenlerden daha üstün özelliklere sahip yeni malzeme üretiminde bulunmuştur [52]. Kompozit malzeme kimyasal ve fiziksel özellikleri farklı olan, birbiri içerisinde çözünmeyen iki farklı malzemenin, makro düzeyde bileşimi olarak tanımlanabilir [53].

M.Ö. 1500 yıllarında evlerin duvarlarının yapımında bambu kamışı ile güçlendirilmiş çamur duvarlar ilk kompozitlere örnek olarak verilebilir. Günümüz modern kompozitleri ise, 1930'lu yıllarda reçine ile takviyelendirilmiş cam elyafın kullanımı ile başlamıştır [54].

Kompozit malzemelerin diğer malzemeler karşındaki üstün özellikleri [55];

- a) Düşük yoğunluklarına rağmen sergilemiş oldukları yüksek dayanım,
- b) Kendisini oluşturan malzemelerin yük paylaşımı,
- c) İstenilen mekanik özelliklerine göre farklı kombinasyonlarda üretilebilme kolaylığı,
- d) Yorulma, tokluk, ısı ve elektriksel iletkenlik, yüksek sıcaklıklarda göstermiş oldukları kararlılık ve sürünme özellikleri yönünden geleneksel malzemelerden daha iyi özellik sergilemeleri,

olarak tanımlanabilir.

Sahip oldukları (ölgül mukavemet (σ_c/ρ) ve ölgül modül (E/ρ)) özellikleri bakımından kompozit malzemeler, endüstride birçok alanda (uçak, uzay, savunma, denizcilik ve otomotiv sanayisinde) yaygın olarak kullanılmakta ve kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır. Fakat kompozit malzemelerin bu üstün özelliklerinin yanında sahip oldukları bazı olumsuz yanları da bulunmaktadır [56].

Bunlar kısaca aşağıda özetlenmiştir.

- a) Kompozit malzemelerinin birçoğu mekanik özellikleri bakımından, farklı yönlerden gelen kuvvetlere karşı farklı dayanım özellikleri sergilemesi,
- b) Birçok polimer esaslı kompozitlerde çalıştıkları ortamda yer alan çözücü ve aşındırıcı sıvılar nedeniyle matrisin özelliğini yitirmesi,
- c) Kompozitlerin üretimlerinde kullanılan malzemelerin pahalı olması,
- d) Her türlü montaj yöntemine uygun olmamaları, örneğin kaynaklı birleştirmelerinin kısıtlı olması,
- e) Üretimlerinde kullanılan yöntemlerin zahmetli, zaman alıcı ve pahalı olması,
- f) Üretim sonrası şekillendirme işlemlerinin kısıtlı ve bünyelerinde yer alan aşındırıcılar nedeniyle geleneksel talaşlı üretimle şekillendirilmelerinin zor olması,
- g) Çoğu kompozitlerin tekrar yenilenerek üretilmelerinin mümkün olmaması

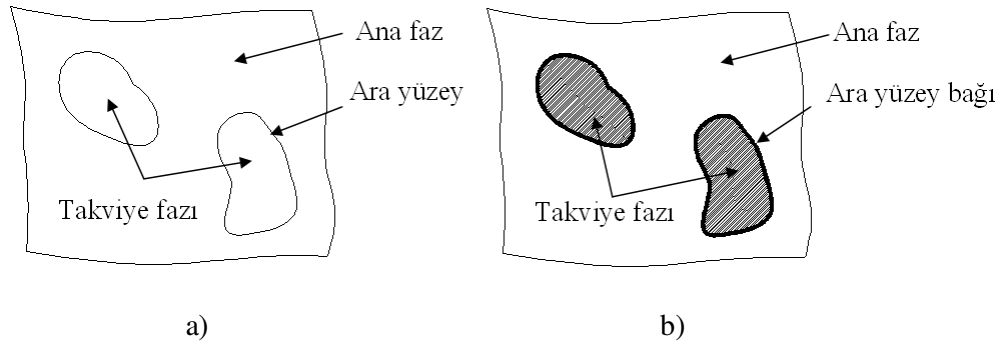
gibi dezavantajlı yanlarının da var olduğu bilinmektedir.

Dezavantajlara karşın kompozit malzemeler alüminyum, titanyum ve çelik gibi metaller karşısında sahip oldukları üstün özellikleri sebebiyle tercih edilmektedirler [54].

3.1. Kompozitlerin Yapısı

Kompozit malzeme kimyasal özelliği farklı olan iki veya daha fazla malzemenin aralarında oluşan bir ara yüzey ile birleşmelerinin sonucunda oluşur. Bileşenler yapı içerisinde özelliklerini korurlar fakat kompozitin yapı ve özellikleri bileşenlerden farklılık gösterir [57]. Kompozit malzeme bileşimi ile mekanik özellikler bakımından matris ve takviye elemanından daha üstün özellikler sergiler [58]. Metal alaşımlarının aksine her bir bileşen kimyasal, fiziksel ve mekanik özelliklerini korur [59]. Kompozit malzemeler genel olarak matris ve takviye elemanı olmak üzere iki ana kısımdan oluşur. Kompozitin ana yapı malzemesi olarak belirtilen nispeten düşük dayanım ve yüksek sünekliğe sahip ve takviye elemanını içerisinde taşıyan

bölümü matris olarak tanımlanırken; daha yüksek dayanım ve sertlik özelliklerine sahip olan matris içerisinde gömülmüş kısmı ise takviye olarak adlandırılır. Kompozit malzemelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesinde matris ve takviye elamanının özellikleri, takviye malzemesinin şekli, boyutları ve yüzde hacmi, matris ve takviye elemanı arasında oluşan bağın özellikleri, matrisin bileşimi etkili olmaktadır [58, 60]. Takviye elemanı ve matris arasında oluşan bağ kompozitin performansının belirlenmesinde etkilidir [58]. Şekil 3.1’de parçacık takviyeli kompozitin bünyesinde oluşan ara yüzey ve ara fazlar görülmektedir.



Şekil 3.1. Parçacık takviyeli kompozitin bünyesinde oluşan ara yüzey ve ara fazlar
a) Doğrudan ara fazsız birleşme, b) Kaplanmış takviye kullanımı

Ana fazın görevi takviye elemanlarını bir arada tutmak, dış yüklerle karşı takviye elamanını korumak ve uygulanan herhangi bir kuvveti takviye fazına iletmektir [59].

3.2. Kompozit Malzemelerde Kullanılan Takviye Elemanları

Takviye elemanları metal matrisli kompozitlere yeni nesil alaşımların mekanik performansı ve dayanıklılığı üzerinde, daha etkili gelişimi için güç sunmaktadır [61]. Kompozit malzemelerin mekanik özellikleri matris takviye sisteminin mikroyapısal özelliklerine güçlü bir şekilde bağlı olduğundan dolayı kompozitin istenilen özelliklerinin elde edilebilmesi için takviye elemanı doğru bir şekilde seçilmelidir [60]. Metal matris kompozit malzemelerde takviye malzemeleri genelde daha sert, daha mukavemetli ve aşınma dayanımı daha yüksek seramik karakterli malzemelerdir. Metal matris malzemelerde takviye malzemesi olarak en çok arı bileşiklerinden oluşan ileri teknoloji seramikleri kullanılır. İleri teknoloji seramikler

oksitler, karbürler ve nitrürler olarak üç gruba ayrılırlar [62]. Metal matrisli kompozit malzemelerin üretiminde takviye malzemeleri genel olarak sürekli elyaflar, kısa elyaflar, kılcal kristaller (whiskers) ve parçacık olarak üretilirler. Takviye malzemelerinin biçimleri birbirlerinden farklıdır ve en-boy oranına göre adlandırılırlar [55]. Elyaflar oryantasyon yönlerinde dayanımı arttırırlar. Parçacık ve whiskers ise yük taşırlar [63]. MMK'lerde yaygın olarak kullanılan bazı takviye elemanları Çizelge 3.1'de verilmiştir.

Çizelge 3.1. MMK kullanılan bazı önemli takviye malzemeleri [55]

Sürekli Elyaflar	Al_2O_3 , $Al_2O_3+SiO_2$, B, C, SiC, Si_3N_4 , Nb-Ti, Nb_3Sn
Süreksiz Elyaflar	
a) Whiskers	SiC, TiB_2 , Al_2O_3
b) Kısa elyaflar	Al_2O_3 , SiC, ($Al_2O_3+SiO_2$)
Parçacıklar	SiC, Al_2O_3 , TiC, B_4C , WC

Seramik takviye malzemelerde yüksek sıcaklık yeteneği ile yüksek mukavemet ve elastikiyet modülü kombine edilmiştir. Sürekli seramik elyaflar, seramik parçacık takviyeli malzemelerden daha maliyetlidir [55]. Metal matrisli kompozitlerde takviye fazı olarak düşük kimyasal reaktiviteleri, yüksek ergime sıcaklıkları ve sertliklerinden dolayı seramik malzemeler (oksit olan ve olmayan seramikler) tercih edilir [64]. Takviye elemanı olarak seramiklerin tercih edilmelerinin başlıca nedenleri şunlardır [65]:

- a) Düşük yoğunluk,
- b) Mekaniksel uyumluluk,
- c) Kimyasal uyumluluk,
- d) Yüksek kimyasal kararlılık,
- e) Yüksek elastikiyet modülü,
- f) Yüksek çekme ve basma dayanımı,
- g) Genellikle metallere kıyasla ucuz olması.

Bütün bu üstün özelliklere rağmen seramik malzemelerin en önemli sakıncaları gevrek karakterde olmaları ve sıvı metaller tarafından ıslatmalarının kötü olmasıdır [64, 65]. En çok kullanılan takviye elemanları; silisyum karbür, bor karbür, titanyum karbür, tungsten karbür, alümina, zirkonya, magnezya, silisyum oksit, bor oksit, silisyum nitrür, alüminyum nitrür, bor nitrür, bor, karbon ve karbon elyaflardır. MMK malzeme üretiminde takviye malzemesinin seçilmesinde, takviye elemanın elde edilebilirliği, matris malzemesi ile uyumluluğu ve kazandıracığı özellikler dikkate alınmalıdır [62]. Çizelge 3.2’de MMK üretiminde kullanılan bazı önemli takviye parçacıkların özellikleri verilmiştir.

Çizelge 3.2. Çeşitli parçacık tipindeki takviye elemanlarının tipik özellikleri [62]

<i>Parçacık takviye malzemeleri</i>	<i>Yoğunluk (g/cm³)</i>	<i>Mukavemet (Mpa)</i>	<i>Elastik modül (Gpa)</i>
Karbür parçacıklar			
SiC	3,22	3100	324
B ₄ C	2,52	2579	448
TiC	4,93	55	269
ZrC	6,73	90	359
Oksit parçacıklar			
Al ₂ O ₃	3,98	221	379
MgO	3,58	4100	417
ZrO ₂	5,89	83	132
CeO ₂	6,9	600	200
ThO ₂	9,86	193	200
Nitrür parçacıklar			
AlN	3,26	2069	310
Si ₃ N ₄	3,18	4100	250

3.2.1. Elyaf lar

Genellikle enine kesitleri dairesel olmakla birlikte bazen oval, dikdörtgen ve hekzagonal olabilen filamentlerle güçlendirilmiş takviye elemanlarıdır [66]. Elyaf lar uzun ve kısa elyaf lar olmak üzere iki kısma ayrılmaktadır [67]. Çapları yaklaşık 100 µm ve boy/çap oranı 100’den yukarı olanlar uzun elyaf olarak adlandırılmaktadır [66]. Boy/çap oranı 10 ila 100 arasında olanlar ise kısa elyaf veya elyaf olarak

adlandırılmaktadır [55]. Elyaf takviye, kompozit yapının dayanımının artışı üzerinde büyük bir rol oynar. Bu dayanım artışı elyafın çapına ve yönüne göre değişim göstermektedir [66]. MMK malzemelerin yüksek sıcaklık mukavemeti SiC gibi elyaflar veya sürekli (SiC ile kaplı B) veya tungsten (W) elyafları ile sağlanmaktadır. Karbon/Al alaşımı gibi MMK'ler de yüksek rijitlik ile karbon elyafları boyunca neredeyse sıfır olan ısıl genleşme katsayısı nedeniyle çok düşük ısıl genleşme göstermektedir [68]. Çizelge 3.3'de çeşitli elyaf takviye elemanlarına ait teknik veriler bulunmaktadır.

Çizelge 3.3. Çeşitli elyaf tipindeki takviye elemanlarının özellikleri [69]

<i>Malzeme</i>	<i>Yoğunluk (g/cm³)</i>	<i>Çekme dayanımı (Gpa)</i>	<i>Özgül dayanım GPa)</i>	<i>Elastikiyet modülü (GPa)</i>	<i>Özgül modül (Gpa)</i>
Al ₂ O ₃	3,95	1,38	0,35	379	96
Aramid	1,44	3,6-4,1	2,5-2,85	131	91
Karbon	1,78-2,15	1,5-4,8	0,7-2,7	228-724	106-407
Bor	2,57	3,6	1,4	400	156
SiC	3	3,9	1,3	400	133

3.2.2. Kılcal kristaller

Kılcal kristaller son derece yüksek dayanımlı, tek kristalli parçacık olarak tanımlanan kısa elyaflardır. Kılcal kristaller, genellikle 0,1-2 µm çapında ve 10-20 µm uzunluğunda olmalarından dolayı boy/çap oranları 10'dan daha küçük olan takviye elemanlarıdır [55]. Oldukça küçük boy/çap oranı ve neredeyse kusursuz kristal yapı özelliklerinden (kristal kafes kusurları yüzeye çıkmış olduğundan) dolayı mükemmel dayanım özelliklerine sahiptirler. Mükemmel dayanım özelliklerine rağmen pahalı olmaları ve matris içerisine homojen bir dağılım olsa bile bazı tercihli yönlendirmelerden dolayı yaygın olarak kullanılan bir takviye elemanı değildir [69]. Kompoziti güçlendirme yönünden kıyaslandıklarında sürekli elyaflar kadar etkili değildir. Kılcal kristaller üzerinde mekanik özellikler bakımından en etkili parametre kılcal kristalin çapıdır. Başlıca kullanılan kılcal kristaller karbon, SiC, α-Al₂O₃, Si₃N₄, SiO₂

esaslı takviye elemanlarıdır [70]. Çizelge 3.4’de çeşitli kılcal kristal takviye elemanlarına ait teknik veriler bulunmaktadır.

Çizelge 3.4. Çeşitli kılcal kristal tipindeki takviye elemanlarının özellikleri [71]

<i>Takviye malzemesi</i>	<i>Yoğunluk (gr/cm³)</i>	<i>Çekme mukavemeti (Gpa)</i>	<i>Elastikiyet modülü (Gpa)</i>
Al ₂ O ₃	3,96	20,69	428
BeO	2,85	13,103	345
B ₄ C	2,52	13,793	482
SiC	3,18	20,69	482
Si ₃ N ₄	3,18	13,793	379
Grafit	1,66	20,69	703

Parçacık takviyeli MMK’lerle karşılaştırıldıklarında kılcal kristallerin mekanik özellikleri çok daha yüksektir. Bununla birlikte kısa lifli MMK’lerin şekillendirilmesi ve işlemesi esnasında kısa liflerin kırılması veya hasar görmesi bu tür takviyelerin kullanımını sınırlamaktadır [72]. Parçacık takviyeli MMK’lerle kıyaslandığında kılcal kristal takviyeli MMK’ler; hem insan sağlığına daha zararlı hem de pahalıdır [73].

3.2.3. Parçacık ve partiküller

Makroskobik boyuttan mikroskobik boyuta kadar değişen aralıklarda kompozitlerin üretiminde en yaygın kullanılan takviye elemanıdır [69]. Boyutları 0,01–0,25 µm arasında değişen boyuttakiler partikül olarak adlandırılırken, kompozitin mukavemetini arttırlar. Parçacık boyutu 1 µm’den daha büyük olanlar ise parçacık olarak adlandırılmaktadır. Her iki tür kompozitte de yöne bağlı olmaksızın matris malzemenin mekanik özelliklerini geliştirebilmektedir. Parçacıklar matris içerisinde tamamen rastgele dağılırlar bu nedenle malzeme anizotropik özellik gösterir [72].

Parçacık olarak adlandırılan takviye elemanları genelde seramik parçacıklar, elmas tozları, grafit ve karbondan elde edilmiş 1 µm’dan büyük tanelerdir. MMK’lerin imalinde en yaygın olarak kullanılan parçacıklar; SiC, Al₂O₃, ZrO₂, TiC, TiB₂, Si₃N₄,

WC, elmas, grafit, karbon gibi aşınma dayanımları yüksek belirli bir formları olmayan çeşitli seramik, karbür bileşikleri, grafit ve karbon taneleridir [56]. Çizelge 3.5’de çeşitli parçacık takviye elemanlarına ait veriler bulunmaktadır.

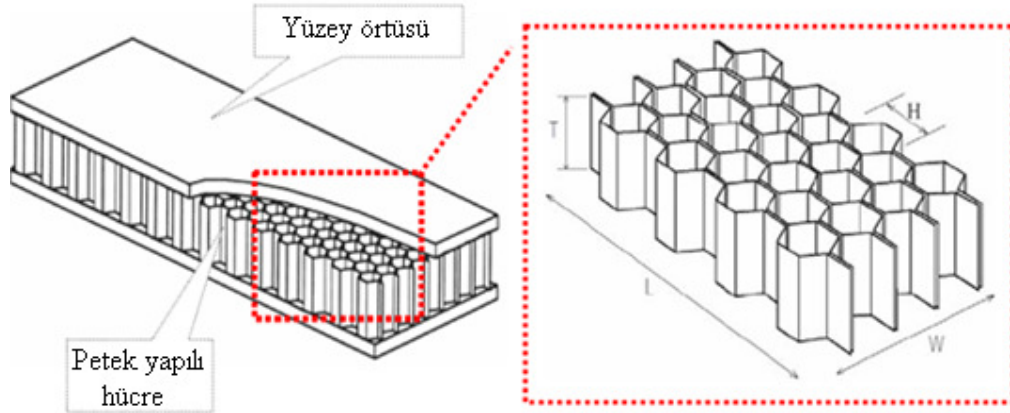
Çizelge 3.5. Parçacık tipindeki çeşitli takviye elemanlarının özellikleri [74]

<i>Takviye malzemesi</i>	<i>Boyut (μm)</i>	<i>Yoğunluk (gr/cm^3)</i>	<i>Çekme mukavemeti (Gpa)</i>	<i>Elastikiyet modülü (Gpa)</i>
Grafit	15-340	1,6-2,2	20	910
SiC	53	3,2	3	480
SiO ₂	40	2,3	4,7	70
MgO	46	2,7-3,6	-	-
Si ₃ N ₄	46	3,2	3-6	360
TiC	46	4,9	-	320
BN	180	2,25	0,8	100-500
Mika	75-180	-	-	170
ZrO ₂	40-340	5,65-6,15	0,14	210
B ₄ C	20	2,5	6,5	480
TiO ₂	40-340	3,9-4,3	-	-
Al ₂ O ₃	30-120	3,97	8	460

Parçacık veya partikül takviyeli kompozitlerde parçacıkların boyutu, parçacıklar arası mesafe ve matris parçacık ara yüzey özellikleri kompozitin mukavemetini etkileyen faktörlerdir [75]. Parçacık takviyeli MMK malzemeleri avantajlı yapan en önemli etkenlerden bir tanesi üretimlerinin geleneksel üretim teknikleriyle kolaylıkla yapılabilmesi ve üretim maliyetlerinin nispeten düşük olmasıdır [72]. MMK’lerin dinamik yüklenme ve çevrim içeren uygulamalarda yorulma davranışı çok önemli bir faktördür. Takviyesiz malzemelerle karşılaştırıldıklarında MMK malzemeler sahip oldukları sert seramik parçacıklardan dolayı yüksek yorulma ve aşınma dayanımına sahiptirler [76].

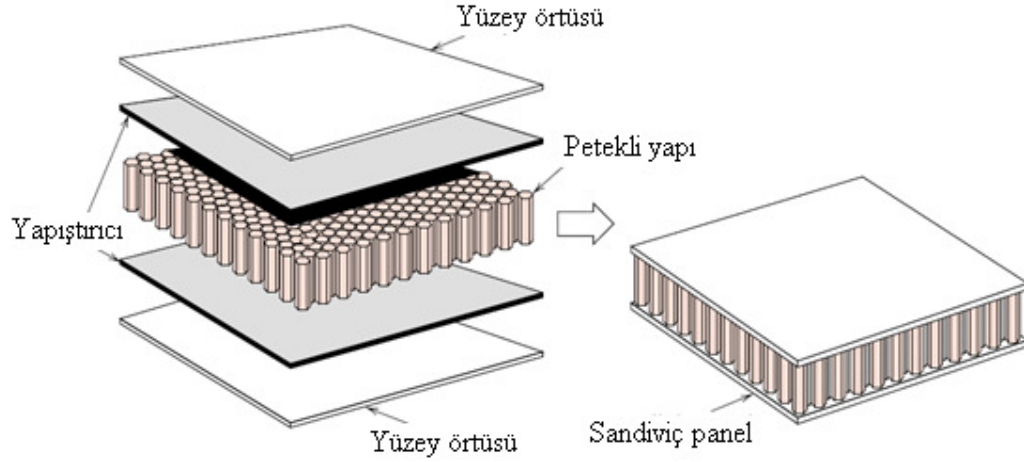
3.2.4. Laminatlar

İnce plaka halindeki parçacıklar genellikle, her yerde yaklaşık olarak aynı kalınlıkta fakat yüzey alanları değişebilen, mikron seviyesindeki yassı parçacıklardır [56]. Kompozit imalatında kullanılan petekli yapı, çok ince tabakaların şekillendirilmesi sonucu elde edilen hücrelerin birleştirilmesi ile oluşturulur. Bu tür yapılar bal petekleri ile birebir benzerlik göstermektedir [77]. Petek yapılı kompozit levhaların hücre kısmını altıgen petek, ya da bal peteği denilen hafif yoğunluklu kısım oluşturur (Şekil 3.2). Petek hücre boyutları levhanın yoğunluğunu belirler [78].



Şekil 3.2. Petek yapılı kompozit levhaların iç kısmını oluşturan bal peteği denilen kısım [78]

Petekli kompozit yapılar, özellikle çarpma sonucu ortaya çıkan enerjinin absorbe edildiği yüksek mekanik dayanım gerektiren konstrüksiyonlarda kullanılır. Oldukça hafif sistemler elde etmek için, sandviç yapıların iç ve dış tabakaları arasında bu petekli yapılar yerleştirilir. Tabakalar arasında petekli yapının yerleştirilmesi, yapının atalet momentinin ve eğilme dayanımının artmasını sağlar. Bal peteği hücrelerin alt ve üst yüzey örtüsü ile kaplanması sonucunda sandviç kompozit levhalar elde edilmiş olur (Şekil 3.3). Yüzey örtüsü olarak genellikle kompozit plakalar kullanılır [78].



Şekil 3.3. Sandviç panelin yapıştırılarak elde edilmesi [69]

İdeal petek yapılı kompozit levha seçiminde, belirlenen levhanın mekanik özellikleri ön plana çıkar. Özellikle yüzey örtü malzemesi, petek yapılı kompozit levhaların eğilme dayanımı üzerinde önemli role sahiptir.

3.3. Kompozitlerin Sınıflandırılması

3.3.1. Polimer matrisli kompozit malzemeler

Polimer matrisli kompozitler ana faz olarak polimer ve bu fazın içine gömülmüş olan elyaf ve parçacıklardan meydana gelirler [66]. Kompozit malzemelerde elyaf sertlik, sağlamlık gibi yapısal özellikleri, plastik reçine malzemesi ise elyafın yapısal bütünlüğü oluşturması için birbirine bağlanması, yükün elyaf arasında dağılmasını ve elyafın kimyasal etkilerden ve atmosfer şartlarından korunmasını sağlar. En çok kullanılan polimer matrisli kompozit malzeme kombinasyonları; cam elyaf/polyester, karbon elyaf/epoksi ve aramid elyaf/epoksi birleşimleridir [79]. Üretim kolaylığı, hafiflik ve düşük maliyetlerinden dolayı kompozit uygulamalarında geniş bir uygulama alanına sahiptirler [69].

3.3.2. Metal matrisli kompozit (MMK) malzemeler

Metal matrisli kompozitler bir metal matris fazı ve ikinci bir faz olan takviye elemanından meydana gelmektedir. Genellikle takviye fazı olarak seramik parçacıklar ve sürekli, süreksiz fiberler, kılcal kristaller kullanılmaktadır [66]. Metal matrisli kompozitler takviye elemanının şekline göre; süreksiz (kısa elyaf, kılcal kristal ve parçacık takviyeli) veya sürekli elyaf takviyeli metal matrisli kompozitler olarak iki ana gruba ayrılır [72]. MMK'lerin mekanik özellikleri takviye elemanının boyutu miktarı ve matris içerisindeki dağılımına bağlıdır [80]. MMK'lerin mukavemet, rijitlik, aşınma, dayanım, kırılma, sönümlenme gibi mekanik özellikleri bilinen diğer geleneksel malzemelere göre daha üstündürler. Kompozitler aynı zamanda monolitik malzemelere nazaran daha iyi termal, mekanik yorulma, sürünme dayanımı, kontrol edilebilir termal iletkenlik ve düşük termal genişleme katsayısına sahiptirler. MMK'lerin yapı ve özelliklerini belirleyen üç önemli unsur bulunmaktadır. Bunlar matris elemanı, takviye fazı ve ara yüzeydir. Takviye elemanlarının temel fonksiyonu gelen yükü taşımak, matrisin rijitliğini dayanımını ve aşınma direncini arttırmaktır. Matrisin fonksiyonu ise takviye elemanı ve matrisi bir arada tutarak yük ve gerilim transferi sağlamak ve bunun yanı sıra çoğu takviye elemanının gevrek ve kırılma olmasından dolayı yüzeylerini çevresel etkilere karşı korumaktır [81].

MMK malzemelerde kullanılan ana faz malzemeleri

Matris, genellikle olumsuz ortamlara dayanıklı bir bağlayıcı malzeme olarak bilinir, kompozitin asıl malzemesini oluşturur ve takviye elemanını olumsuz çevre şartlarına karşı korur. Matris malzemesi olarak polimer, metal ve seramikler yaygın olarak kullanılır [53]. Alüminyum, titanyum, magnezyum, bakır, nikel, süper alaşımlar (nikel ve demir–nikel esaslı) ve intermetalikler MMK'lerde matris malzemesi olarak kullanılırlar. Alüminyum, titanyum, magnezyum elementleri uygulamalarda ağır metallerle oranla daha çok kullanılırlar. Özellikle ağırlığın önemli bir faktör olduğu taşıma, savunma ve uzay sanayisinde en çok tercih edilen matris malzemeleridir [72]. MMK üretiminde Al ve alaşımları, kolaylıkla temin edilebilen SiC, Al₂O₃ ve grafit

gibi takviye malzemeleriyle kimyasal ve fiziksel olarak uygunluk gösterdiklerinden dolayı matris malzemesi olarak tercih edilmektedirler [82].

Alüminyum alaşımları

Alüminyum alaşımları düşük yoğunlukları, yüksek korozyon dayanımları, çökelme sertleşmesi ile dayanımlarını artırabilme kabiliyetleri, yüksek ısı ve elektrik iletkenlikleri, kolay işlenebilirlikleri, ikincil işlemlerle modifiye ediliyor olmaları ve kolay tedarik edilebilme gibi özellikleri sebebiyle uzay, otomotiv, havacılık endüstrisinde tercih edilen malzemelerdir [83]. Alüminyum alaşımları üretim metotları esas alınarak dövme ve döküm olmak üzere iki ana alt guruba ayrılabilir. Dövme alaşımları; yeniden ergitme ve döküm, ön ısıtma veya homejenizasyon, sıcak haddeleme ve soğuk haddeleme işlemlerinden geçerek üretilmektedir. Dövme alüminyum alaşımlarını belirlemek için dört basamaklı bir kodlama yöntemi kullanılır. Çizelge 3.6'da dövme alüminyum alaşımları ve ısıl işlem durumları sunulmuştur. 1XXX serisi saf alüminyumunu ifade eder. Burada son iki basamak alüminyum alaşımını ve alüminyumun saflığını gösterir. İkinci basamak orijinal alaşımın modifikasyonunun impurite sınırlarını gösterir [84].

Çizelge 3.6. Dövme alüminyum alaşımları ve ısıl işlem durumları [84]

Dövme Alüminyum Alaşımları		
<i>Alaşım Elementleri</i>	<i>Alaşım Türü</i>	<i>Isıl İşlem Durumu</i>
Arı Al (>%99 Al)	1xxx	Yaşlanmaz
Al-Bakır	2xxx	Yaşlanabilir
Al-Silisyum (Cu-Mg ilave edilmiş)	3xxx	Yaşlanmaz
Al-Silisyum	4xxx	Mg eklenirse yaşlanmaz
Al-Magnezyum	5xxx	Yaşlanmaz
Al-Magnezyum ve Silisyum	6xxx	% 2 Mg eklenirse yaşlanabilir
Al-Çinko	7xxx	Yaşlanmaz
Al-Kalay	8xxx	Yaşlanmaz
Al-Diğer elementler	9xxx	% 2 Cu, Mg eklenirse yaşlanır

Alüminyum döküm alaşımları akıcılık ve besleme yeteneği; dayanım süneklik ve korozyon direnci için geliştirilmişlerdir. Döküm alaşımları da dövme alaşımlarına benzer dört basamaklı bir kodlama yöntemi kullanılmaktadır. Fakat kodlama sisteminde son sayı nokta yada virgül ile ayrılmıştır. Çizelge 3.7’de döküm alüminyum alaşımları ve ısıtım işlem durumları sunulmuştur.

Çizelge 3.7. Döküm alüminyum alaşımları ve ısıtım işlem durumları [84]

Döküm Alüminyum alaşımları		
Alaşıım elementleri	Alaşıım türü	Isıtım işlem durumu
Arı Al (>%99 Al)	1xx.x	Yaşlanmaz
Al-Bakır	2xx.x	Yaşanabilir
Al-Mangan	3xx.x	Yaşlanmaz
Al-Silisyum	4xx.x	Yaşlanmaz
Al-Magnezyum	5xx.x	Yaşlanmaz
Al-Magnezyum-Silisyum	6xx.x	Yaşanabilir
Al-Çinko	7xx.x	Yaşlanmaz
Al-Diğer elementler	8xx.x	Yaşanabilir
Kullanılmamış seriler	9xx.x	% 2 Cu, Mg eklenirse yaşlanır

Bakır alaşımları

Bakır alaşımsız olarak veya diğere metallerle alaşıım şeklinde yaygın olarak kullanıldığı için önemli bir mühendislik malzemesidir. Yüksek elektrik iletkenliği, korozyon direnci, kolay fabrikasyon, yeterli çekme dayanımı, kontrol edilebilen tavlama özellikleri, genel lehimleme ve birleştirme özelliklerine sahiptir [84].

Magnezyum alaşımları

Magnezyum 1,74 g/cm³ yoğunluğuyla, alüminyumdan daha hafiftir ve düşük sıcaklıkta erir. Magnezyum alaşımları alüminyum kadar sağlam olmakla beraber, dayanım ağırlık oranları alüminyum ile mukayese edilebilir düzeydedir. Bunun sonucu olarak, magnezyum alaşımları uzay uygulamalarında, yüksek hızlı makinelerde, taşımacılık ve el ile işleme ekipmanlarında kullanılır. Magnezyum

düşük elastikiyet modülü, zayıf yorulma, sürünme ve aşınma direncine sahiptir. Magnezyum alaşımları dövülebilir, dökülebilir ısıl işlem uygulanabilir ve uygulanamaz sınıfları bulunur. Mukavemetlenmeleri; katı eriyik mukavemetlenmesi, pekleşme, tane boyutu kontrolü, dağılım mukavemetlenmesi ve yaşlandırma ile sağlanır [83].

Titanyum alaşımları

Titanyum $4,54 \text{ g/cm}^3$ yoğunluğu ve 115 GPa elastikiyet modülü ile önemli uzay malzemelerinden biridir. Titanyumun alaşımlarının yoğunluğu $4,3 \text{ g/cm}^3 \sim 5,1 \text{ g/cm}^3$ elastikiyet modülü ise 80~130 GPa aralığında değişmektedir. Titanyum nispeten yüksek ergime ($1672 \text{ }^\circ\text{C}$) sıcaklığı, iyi oksidasyon ve korozyon direncine sahiptir. Titanyum, özellikle karbon ve oksijen olmak üzere, birçok elemente karşı yüksek reaksiyon eğilimi olan bir malzemedir. Titanyum oksijene karşı son derece duyarlıdır bu nedenle oda sıcaklığında bile oksitlenme oluşturabilir [55, 85]. Titanyum hemen hemen bütün silikat taşlarında (TiO_2), ilmenit (FeTiO_3) mineralinde ve bor oksitte bulunur. Saf titanyum TiCl_4 bileşiğinin magnezyum ile indirgenmesi sonucu elde edilir. Titanyum alaşımları yapılarındaki faz varlıklarına göre sınıflandırılır. Esas olarak başlıca α fazından oluşan alaşımlar α alaşımları olarak adlandırılırken, küçük miktarlarda β karıştırıcı elementlerle birlikte prensip olarak α fazı içerenler yakın β titanyum alaşımları olarak adlandırılır. $\alpha+\beta$ 'nin karışımından oluşan alaşımlar $\alpha+\beta$ alaşımları olarak sınıflandırılır. α ve yakın α alaşımlarına genellikle ısıl işlem uygulanamaz ve kaynaklanamaz $\alpha+\beta$ alaşımlarına ısıl işlem uygulanabilir, fakat yüksek sıcaklıklardaki sürünme dirençleri α ve yakın α alaşımları kadar iyi değildir. β alaşımlarına ısıl işlem uygulanabilir, fakat yüksek dayanım şartlarında nispeten yüksek yoğunluğa ve düşük sünekliğe sahiptir [84].

MMK malzemelerde kullanılan takviye elemanları

Alüminyum ve alaşımları aşınma davranışını ve mekaniksel dayanımını geliştirmek için seramiklerle takviye edilirler [86]. Metal matrisli kompozitler için kullanılan takviye elemanları; partiküller, sürekli ve süreksiz fiberler, whiskersler ve

benzerleridir. Takviye elemanlarının seçimi kompozit için büyük önem arz ettiğinden, takviye elemanlarının özelliklerinin de çok iyi bilinmesi gerekmektedir. Fiberler; yoğunluk, üretim kolaylığı, ısıl direnç, kimyasal uyumluluk gibi kriterlere göre tetkik edilip, seçilmektedir. Özellikle uzay ve uçak sanayinde düşük yoğunluklu, yüksek mukavemet ve elastikiyet modüllü takviye elemanlarının kullanılması kaçınılmazdır [87]. Yüksek elastikiyet modüllü ve yüksek mukavemetli bazı malzemelerin fiber veya whiskers şeklinde üretilmeleri zordur ve özel tekniklerin uygulanması gerektiğinden ekonomik değildirlir. Bunun yanında, metalik kompozitler genellikle yüksek sıcaklık uygulamaları için geliştirildiklerinden yüksek sıcaklıklarda fiberlerin mukavemetlerini koruma özellikleri, oda sıcaklığındaki mekaniksel özelliklerinden daha önemlidir. Takviye elemanının metalik matris ile iyi bir ara yüzey bağı oluşturması, matris içerisinde reaksiyona girmemesi gerekir [87].

Bor karbür

Alüminyumun kolay elde edilebilir olması, düşük yoğunluklu olması ve uygun üretim şartları altında B_4C ile tepkime oluşturması nedeniyle takviye elemanı olarak B_4C tercih edilmektedir [86]. Bor karbür metalik olmayan sert malzeme grubunun en önemlilerinden biri olup, rombohedral kristal yapısına sahiptir. Bor karbür, elmas ve kübik bor nitrürden sonra bilinen en sert üçüncü malzemedir. Bor karbür kimyasal maddelere karşı yüksek korozyon direnci, mükemmel yüksek sıcaklık mukavemeti, düşük yoğunluk, yüksek elastiklik modülü gibi özelliklere sahiptir. Bor karbürlerin oksitlenmede ortamın etkisi ve tane boyutu önemli parametrelerdir. İri tane boyutlu tozlarda oksitlenme yaklaşık olarak $1000\text{ }^\circ\text{C}$ 'de başlarken ince tanelilerde bu sıcaklık $600\text{ }^\circ\text{C}$ 'ye kadar düşebilmektedir. Ayrıca bor karbür tozlarının kuru ve yaş hava ile yapılan oksidasyon çalışmalarında su buharı bulunan ortamlarda $250\text{ }^\circ\text{C}$ ve kuru ortamlarda ise $450\text{ }^\circ\text{C}$ 'de oksitlenmeye başladığını ortaya koymuştur. Nemli ortamlarda sıcaklığın artması ve tane (parçacık) boyutunun azalmasıyla oksitlenme artar. Asit ve bazlarla etkileşim çok düşüktür. Ancak $HF-H_2SO_4$, $HF-HNO_3$ ve $H_2SO_4-HF-HNO_3$ gibi asit karışımları uzun süreli temas durumunda az oranda çözünme meydana gelir. Toz boyutu küçüldükçe bu karışımlarla etkileşim artar [64, 88]. Bor karbürün genel özellikleri Çizelge 3.8'de görülmektedir.

Çizelge 3.8. Bor karbürün genel özellikleri [89]

Görünümü	Siyah, parlak toz
Kimyasal Formülü	B ₄ C
Molekül Ağırlığı (g)	54,17-58,50 (55,26)
Bor içeriği (%)	77,83 – 79,47 (78,26)
Özgül Ağırlığı (g/cm ³)	2,51
Ergime Noktası °C	2450
Kaynama Noktası °C	>3500

B₄C tozları, SiC veya Al₂O₃ gibi aşındırıcı tozlara kıyasla daha yüksek maliyetli olması sebebiyle, B₄C takviyeli alüminyum matrisli kompozitler (AMK) üzerinde yapılan araştırmalar nispeten sınırlı kalmıştır [16].

Karbon ve grafit

Karbon ve grafit fiberler, düşük yoğunluklu, yüksek mukavemet ve elastikiyet modüllü, ısıl kararlılıkları ve dirençleri yüksek olan takviye elemanlarıdır. Bu özellikleri nedeniyle Kompozitlerde takviye elemanı olarak yaygın olarak kullanılırlar. Karbon ve grafit fiberler organik maddelerden üretildikleri için organik fiber olarak da adlandırılırlar [90]. Karbon ve grafit pekiştiriciler kompozit malzeme teknolojisinde çeşitli şekillerde kullanılırlar. Sürekli fiberler, sayıları 400-160 000 arasında değişen iplik demeti şeklinde ve çapları da yaygın olarak 8 mm civarındadır. Süreksiz takviye elemanları, değişik boylarda kesilmiş öğütülmüş fiberlerden oluşur. En kısa fiberler 0,03~3 mm arasında değişen öğütülmüş karbon fiberlerdir. Ortalama olarak boyun çapa (L/d) oranı 30 kadardır. Elyaf şeklindeki pekiştiricilerin boyları yaklaşık 6,4 mm ve L/d oranı ise 800 civarındadır [91].

Ara Yüzey Bağı

Metal-seramik sistemlerinde, kompozitin tüm özellikleri, önemli ölçüde metal-seramik ara yüzeyinin özelliklerine bağlıdır [92]. Kompozit malzemelerde iki yada

daha fazla sayıda farklı faza sahip malzemeler bir araya geldiğinde, malzemenin beklenen özelliklerin gerçekleşebilmesi için fazlar arasında belirli fiziksel ve kimyasal uyumun olması gerekir [87].

Matris ile takviye elemanı arasındaki fiziksel uyum, süneklik ve ısı genleşme özellikleri ile ilgilidir. Kimyasal uyum ise, ara yüzey bağı ve ara yüzey reaksiyonları açısından önem taşır. Takviye elemanı ve matrisin ısı genleşme katsayıları arasındaki uyum, kalıcı yapısal gerilmelerin oluşması yönünden önemlidir [87].

Kompozitin takviye fazlarla kuvvetlendirilmesi, matris ile takviye malzemesi arasındaki bağı kuvvetine bağlıdır. Güçlü bir ara yüzey, yükün takviye malzemesinden matris malzemesine iletilmesini ve matris malzemesinde dağıtılmasını sağlar. Rijitlik, kırılma tokluğu, yorulma, ısı genleşme katsayısı, ısı iletkenlik ve sürünme gibi özellikler de ara yüzeyin özelliklerinden etkilenmektedir [92].

3.4. Metal Matrisli Kompozitlerin Üretim Yöntemleri

Kompozit üretim tekniği önemli bir husustur. Matris ve takviye malzemesinin seçimine ve takviye türüne göre üretim yöntemleri çok farklılık gösterir. Yöntemlerde dikkat edilmesi gereken noktalar; yüksek sıcaklıklarda takviye malzemesi ve matris arasında oluşan reaksiyonlar (kompozitin hazırlanmasında ya da servis koşullarında), matris ve takviye malzemesi arasındaki yeterli bağ kuvvetinin sağlanması ve takviye malzemesinin matris içindeki dağılımıdır. Bileşenlerin verilen ayarlamaları için, özellikler ve maliyet arasındaki temel bağıntı üretim yöntemleri ile belirlenmektedir [93]. Parçacık, kısa elyaf veya kılcal kristal vb. takviyeli MMK'lerin endüstriyel uygulamasında ilk aşama kompozit malzemenin üretimi, ikinci aşama ise üretilen kompozitin kullanımına göre şekillendirilmesidir [72].

MMK malzemelerin üretim yönteminin seçiminde ürün kalitesi ve maliyeti temel faktördür. Mekanik özelliklerin geliştirilmesi ve ekonomik bir üretim için etkin üretim yöntemleri geliştirmek bu alanda yapılan çalışmaların önemli bir kısmını

teşkil etmektedir [67]. Bu amaçla çeşitli üretim yöntemleri geliştirilmiş olup MMK malzemelerin üretilmesinde kullanılan yöntemler üretim esnasındaki metal matrisin sıcaklığına göre gruplandırılabilir. Buna göre üretim yöntemleri:

- i) Sıvı hal üretim yöntemleri,
- ii) Katı hal üretim yöntemleri,
- iii) Sıvı-katı hal üretim yöntemleri,

3.4.1 Sıvı hal üretim yöntemleri

Ergimiş metal karıştırma yöntemi

Sürekli olmayan fiber ve parçacıklarla takviyeli kompozitlerin imalatlarında, en genel kabul gören ve pratikte ticari üretime en uygun imalat yöntemi, ergimiş metal karıştırma yöntemidir [55, 56, 72]. Sıvı faz ortamında üretim yönteminin temelini sıvı metalin karıştırılması ve parçacıkların karıştırılan sıvı metal içerisine katılması oluşturur. Karıştırmalı döküm yönteminde genellikle parçacık, kırılmış elyaf veya kılcal kristal şeklinde olan takviye elemanı kullanılır. Karıştırmalı döküm yönteminin en basit şekli vorteks (girdap) yöntemidir [94]. Genelde metal matrisli kompozitlerin bu yöntemle üretim sentezi, üretim için seçilmiş olan metalin ergimesi ve sonrasında takviye fazının ilave edilerek, uygun bir dağılımın elde edilmesi için karıştırılmasından oluşmaktadır. Ergimiş metal karıştırma yöntemi ile MMK malzemelerin üretiminde birkaç faktörün göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Bu faktörler kısaca aşağıda özetlenmiştir [56];

- a) Takviye elemanının homojen dağılımının elde edilme zorluğu,
- b) Matris ile takviye elemanı arasındaki ıslatabilirliğin zorluğu,
- c) Üretim sonrası elde edilen malzemelerde gözenek oluşması,
- d) Takviye fazı ile alaşım arasındaki kimyasal reaksiyon [95].

Parçacık takviyeli metal matrisli kompozitlerin karıştırmalı döküm yöntemiyle üretilmesi sırasında aşağıda özetlenen problemlerle karşılaşılabilir;

- a) Takviye malzemesinin içyapıda homojen olarak dağılımını sağlamanın zorluğu,
- b) Matris malzemesinin seramik esaslı takviye malzemesini ıslatmasının kötü olması,
- c) Karıştırma sırasında gaz hapsolmesi ile içyapıda gözenek (porozite) oluşması,
- d) Karıştırmanın vakum veya soy gaz ortamında yapılmaz ise içyapıda oksit inklüzyonlarının oluşması,
- e) Sıvı metalle takviye parçacıklarının uzun süre temas etmesi nedeniyle istenmeyen kimyasal reaksiyonların oluşması,
- f) Karıştırma sırasında veya karıştırma sonrası yerel parçacık topaklanmalarının (kümelenme) oluşması,
- g) Uzun elyafların kullanılamaması ve takviye yönlenmesinin yapılamaması,

şeklinde sıralanabilir [67, 82, 90].

Deney düzeneği ergitme fırını ile mekanik bir karıştırıcıdan oluşur. Alüminyum ya da alüminyum alaşımı, pota içerisinde ergitilerek, parçacık ilave edilmeden önce koruyucu bir gaz (Azot) ile gaz giderme işlemine tabi tutulur. Mekanik karıştırıcı ve kanatçıkları sıvı metal ile reaksiyona girmeyen (grafit) malzemeden yapılır. Karıştırma hızı vorteks oluşturacak düzeyde ayarlanır. Girdap oluştuğunda önceden tartılmış parçacıklar belirli bir besleme hızında girdabın içine katılırlar. Parçacık katma işlemi tamamlandıktan sonra karıştırma işlemi bir süre daha sürdürülür veya hemen döküm yapılır [96]. Vortex metoduyla iyi nitelikli MMK malzeme elde edebilmek için karıştırma hızı, karıştırıcı kabiliyeti, karıştırma sıcaklığı, takviye hızı gibi işlem parametrelerinin hassas olarak kontrol edilmesi gerekmektedir [90]. Ara yüzey reaksiyonları sonucunda oluşan bir kusur olan gözeneklilik (porozite) MMK malzemeleri mekanik özelliklerini olumsuz etkiler. Takviye elemanının yüzde hacmi ve parçacık boyutunun artmasıyla gözenekliliğinde arttığı belirlenmiştir [95]. Bunlara ilaveten, ergimiş haldeki kompozit malzemeyi kalıba alım işleminde kalıp sıcaklığının artırılması, dökümün kalitesini artıracığından, porozitenin azaltılmasına katkı sağlamaktadır [97].

Atomizasyon (sprey) döküm yöntemi

Hızlı katılaşma yoluyla direk olarak eriyikten alaşım ve kompozit malzemelerin üretildiği yöntem spreya döküm veya spreya biriktirme yöntemi denir. Bu yöntemde ergimiş metalin atomizasyonu ile üretilen damlacıkların püskürtülerek bir kollektör (toplayıcı) üzerinde toplanması sağlanır. Kollektör üzerinde katılaşarak üretilen bu atomize haldeki matris ve takviye daha sonra ekstrüzyon, dövme veya haddeme ile şekil verilebilir [98]. Bu yöntemde, parçacık takviyeli kompozitlerin üretimi için püskürtülecek metal, indüksiyon fırınında ergitilir ve potaya basınç uygulanır. Ergimiş metal pota tabanından nozul ile püskürtülürken, aynı zamanda parçacıklar atomize edilmiş sıvı gaz içerisine asal gazlarla enjekte edilerek, önceden ısıtılmış alt katman üzerine çökeltir ve toplayıcı üzerinde katı bir çökelti oluşur [99]. Spreya biriktirme yönteminin iki önemli avantajı vardır. Bunlardan birincisi eriyikten direk olarak tek bir operasyonla net şekillendirilmiş ürün elde etme imkanındır. Bu yöntem ingot metalurji (İ/M) ve toz metalurjisi yöntemlerinde uygulanan birçok işlem basamağını azaltarak önemli ölçüde ekonomik kazanç sağlar. Spreya şekil verme yönteminin ikinci avantajı; metalurjik ve mekanik özelliklerde önemli ölçüde iyileşmenin sağlanmasıdır. Spreya şekil verme yöntemiyle üretilmiş ürünler ince taneli, alaşım elementleri makroskopik segregasyonundan arındırılmış ve düşük oksit içeriklidir [99].

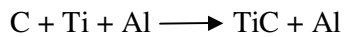
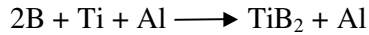
Sıvı metal emdirme (infiltrasyon) yöntemi

MMK üretim yöntemlerinden biri olan basınçlı infiltrasyon yöntemi, takviyeden üretilen gözenekli preform içerisine sıvı metale basınç uygulanarak infiltre edilmesidir [100, 101]. Basınçlı infiltrasyon yönteminde basınç, sıvı metal yüzeyine uygulanarak sağlandığından kolay bir metottur [102]. Genellikle, ön kalıp içerisinde yer alan takviye elemanlarına, sıvı metalin emdirilmesiyle yapılan bir kompozit malzeme üretim tekniğidir. Sıvı metal genellikle önceden hazırlanmış elyafların boşlukları içine enjekte edilir [103]. İnfiltrasyon yöntemi, havada inert gaz kullanılarak veya vakumlu atmosferde gerçekleştirilebilir. Takviye elemanları olarak kılcal elyaflar, parçacıklar, kısa yada uzun elyaflar kullanılır [104]. Matris ve takviye

elemanını birleştirmek için gerekli olan basınç, özellikle takviye elemanının matris malzemesi tarafından ıslanabilirliğine bağlıdır [105]. Sıvı metalin seramik preforma infiltrasyonu sırasında, infiltrasyon verimini etkileyen, diğer bir değişle sıvı metalin preforma dolmasını engelleyen en önemli faktör, seramik ve metal arasındaki ara yüzey enerji farklılıklarıdır [106]. Ergimiş metal emdirme yönteminde istenilen şekilde bir ara yüzey bağının oluşmasında takviye elemanına uygulanan ısıl işlem ve uygulanan emdirme yönteminin önemi büyüktür. Bu kompozit üretim tekniğinde, farklı ergimiş metal emdirme yöntemleri kullanılmaktadır. Bunlar; ergimiş metalin yerçekimi ile kendiliğinden sızma özelliği ve gerekirse vakum desteği ile aşağı yönlü emdirme, yukarı yönlü kapilarite özelliği ve vakum ile emdirme, gaz ya da mekanik basınç uygulayarak ergimiş metal emdirme yöntemleridir [56].

Reaksiyonla faz oluşturma (in-situ) yöntemi

Matris fazı içerisinde termodinamik olarak dengede olan, parçacık boyutu ve hacim içeriğinin belirlenmesine izin veren bir kompozit malzeme üretim yöntemidir [107]. Reaksiyon yöntemi reaktif (in-situ) ve reaktif olmayan (ex-situ) yöntemleri olmak üzere iki guruba ayrılır. 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. Kullanılan parçacık boyutu genellikle 0,25~1,5 µm aralığındadır. TiB ve TiC arasında oluşan reaksiyon [55];



Ex-situ yönteminde seramik parçacıkların matris malzemesine katılmasından önce ön işlem yapılması gerekmektedir. Burada nadiren 1 µm altında parçacık boyutu kullanılır. In-situ yönteminde kompozitin üretimi esnasında bileşik ve element arasında veya elementler arasında kimyasal reaksiyon tarafından metal matris takviye elemanı sentezlenir [108]. Takviye fazı ergimiş metal emdirme ve toz metorojisi işlemlerinde olduğu gibi ayrı ayrı ve sonra eklenen takviye fazı ikinci bir işlem esnasında matris içerisinde sentezlenir. Katı ve gaz bileşikler ergimiş matris içerisine

katılır ve takviye fazı; matris malzemesi, matris malzemesinin içerisindeki alaşımlar ve ilave edilen bileşiklerin reaksiyonları sonucu oluşur [109]. Eriyik içerisinde oluşacak takviye fazlarının, genellikle karbür yada oksit içerikli seramik parçacıklar halinde oluşması sağlanır. Aynı zamanda bu ikincil seramik esaslı fazların yapı içerisinde homojen bir dağılım sergilemesi gerekmektedir. Denge halindeki takviye elemanlarının oluşması matris içindeki alaşım elementlerine ve miktarlarına bağlı olduğu için bu yöntem her türlü matris alaşımına uygulanmaz [56]. Matris elemanı olarak genellikle Al, Ni veya bir intermetalik kullanılır [55]. Bu yöntemin avantajları kısaca aşağıda özetlenmiştir:

- a) Takviye elemanları termodinamik yönden dengededir ve yapı sıcaklık değişimlerinden etkilenmez,
- b) Takviye form kontrolü yapılabilir ve aynı zamanda farklı kimyasal ya da fiziksel özelliğe sahip takviye elemanları aynı ortamda oluşturulabilir,
- c) Takviye elemanlarının şekli ve boyutları kontrol edilebilir,
- d) Metalik ya da intermetalik malzemelere uygulanabilir. İstenilen hacim oranında takviye elemanı ilave edilebilir,
- e) Elde edilen kütük haldeki kompozit malzemeler klasik metalurji yöntemi ile (haddeleme, çubuk çekme v.b.) tekrar şekillendirilebilir [110].

In-situ reaksiyon yöntemi ıslatılabilirliği arttırarak zararlı ara yüzey bağlarını da ortadan kaldırır. Kontrollü yönlü katılaşma iki fazı ayırmak için yapılır. Takviye elemanlarının denge halinde oluşturulabilmesi için, ergimiş matrise dışarıdan katı-sıvı formlarından herhangi birinden alaşımlayıcı katkı maddelerinin ilavesi söz konusudur [55].

3.4.2. Katı hal üretim yöntemleri

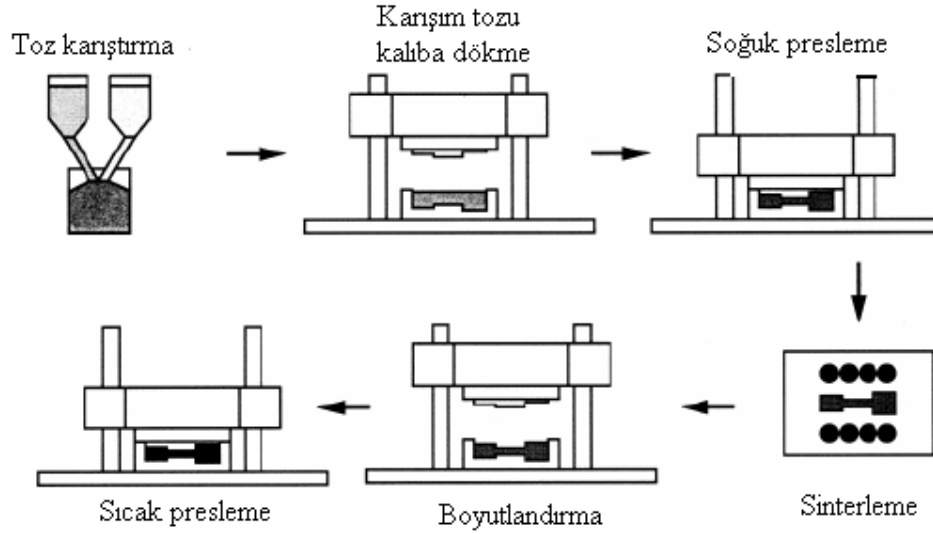
Toz metalurjisi üretim yöntemi

Toz metalurjisi, bireysel nesnelere finiş-yarı finiş olarak karışım-alaşımli tozlar ile veya metalik olmayan bileşenlerin ilavesi olmaksızın metal tozlarını üreten bilim ve

sanat dalı olarak tanımlanır. Özellikle 20 yüzyılın son çeyreğinde atomizasyon, MA, soğuk izostatik presleme, ve sıcak izostatik presleme gibi yeni işleme tekniklerinin gelişimi ile toz metalurjisi yöntemini olağan üstü geliştirmiştir [111]. Bu yöntemler TM ile MMK kompozitlerin üretiminde yüksek miktarlardaki takviye fazının yapı içerisinde homojen dağılımı ve düşük üretim sıcaklığı gibi geleneksel sıkıştırılmalı döküm yöntemiyle üretiminin zor gerçekleştirildiği durumlar karşısında birçok avantaj sağlamaktadır [9]. Toz metalurjisi yönteminin avantajları şu şekilde sıralanabilir;

- İşlemeyi azaltır veya ortadan kaldırır, çok az veya hiç hurda,
- Etkili malzeme kullanımı, % 95 üzerinde verimli kullanım,
- Yakın ölçü toleransı sağlar, olabildiğince yakın net şekil,
- Daha iyi yüzey kalitesi elde edilebilir,
- Korozyon direncini geliştirmek için kaplama ve aşınma direncinin gelişimi, veya dayanımın artırılması için ısıtma işlem seçeneği sağlar,
- Diğer metal işleme yöntemleriyle pratik olmayan karmaşık parçaların, üretimini kolaylaştırır,
- Enerji verimliliği,
- Çevre dostu olması,
- Diğer birçok üretim yöntemiyle karşılaştırıldığında parçaların üretimi çok daha uygundur,
- İmalatı zor olan sert metal parçaların üretimi kolayca gerçekleştirilebilir [111].

Toz metalurjisi üretim yöntemi metal tozlarının üretimi ve üretilen tozların imalatı istenilen parçaların şekline dönüştürülmesi işlemidir. Bu yöntem toz üretimi, üretilen tozların karıştırılması, tozların preslenmesi, sinterleme ve isteğe bağlı işlemler (infiltrasyon, yağ emdirme, çapak alma) olmak üzere belirli aşamalardan oluşur [62]. Bu yönteme ait imalat basamakları Şekil 3.4'te gösterilmiştir.



Şekil 3.4. Toz metalurji ürünlerin üretim basamakları [55]

3.4.3. Katı-sıvı hal üretim yöntemleri

Osprey biriktirme yöntemi

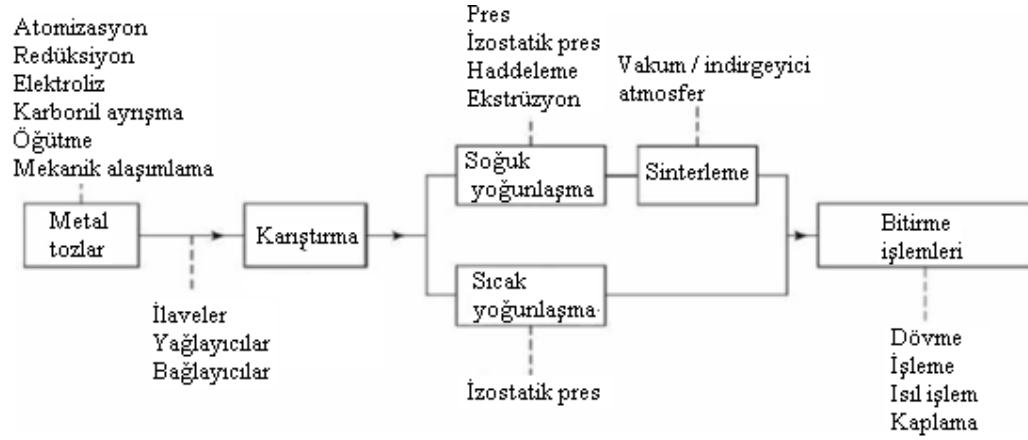
Hızlı katılaşma veya doğrudan eriyikten alaşım veya kompozit malzemelerin üretildiği işleme sprej şekil verme, sprej döküm veya sprej biriktirme yöntemi denir. Bu yöntemde ergimiş metalin atomizasyonu ile üretilen damlacıkların püskürtülerek bir toplayıcı üzerinde toplanması sağlanır [98]. Alaşım sprej hücresinin en üstünde bulunan pota içerisinde indüksiyonla ertilir. Ergiyen alaşım potanın altında bulunan refraktar püskürtücünün içine geçer. Burada 0,6~1 MPa basınç azot veya argon gazı tarafından atomize edilerek üretilen damlacıklar püskürtülerek bir kollektör üzerinde toplanır. Atomize edici gaz püskürtülme esnasında damlacıklardan önemli oranda ısıyı uzaklaştırarak onların soğumasına yardımcı olur. Soğutulan damlacıklar toplayıcı üzerine gelerek burada birikir ve yoğun bir birikim oluşturur [113, 114].

4. TOZ METALURJİSİ

4.1. Toz Metalurjisinin Teknik Özellikleri

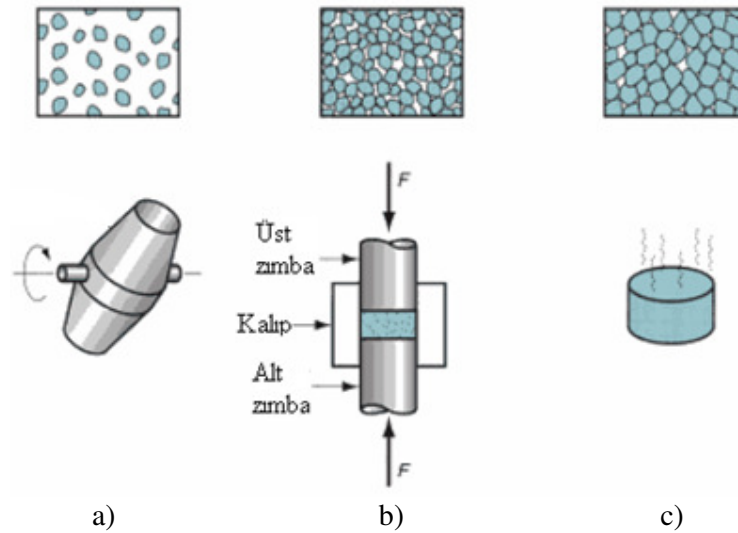
Demir esaslı seri üretim parçalarının geleneksel yöntemlerle üretimine alternatif olarak toz metalurjisi üretim yöntemleri geliştirilmiş ve kullanımları son yıllarda oldukça büyük bir gelişme kaydetmiştir [112]. Toz metalurjisi, metalurjinin metalik toz veya bu tozların şekillendirilip sinterlenmesiyle yapılan ürünlerin imalatı ile ilgili bölümüdür. Bir başka ifadeyle uygun metotlarla hazırlanan metal tozların karıştırılıp sıkıştırılarak istenilen şekle sokulduktan sonra atmosfer kontrollü fırınlarda sinterlenerek makine parçası üretimi metodudur [115]. Toz metalurjisi döküm, şekillendirme ve işleme gibi geleneksel üretim yöntemleri ile karşılaştırıldığında pek çok avantaj sunmaktadır [116]. Bu işlemin en önemli avantajlarından bir tanesi farklı seramik tozların kolaylıkla karışmasıdır. Bu eritme ve döküm işlemi ile üretilebilen bu bileşenler özel fiziksel ve mekanik özellikleri ile yeni ve gelişmiş yeni mühendislik kompozit malzemelerin üretim olasılığını doğurur. 1970'li yılların başlarından itibaren toz metalurjisi ile üretim için sıcak presleme, sıcak izostatik presleme, soğuk izostatik presleme, dövme ve extrüzyon gibi çeşitli teknikler geliştirilmiş ve başarılı bir şekilde uygulanmıştır. Temel ilke bir kalıp duvarı içerisine sıkıştırılan toz parçacıklarının yüksek bir dış baskı altında sıkıştırılmasıdır. Yüksek dış baskı uygulaması ile yüksek yoğunlukta kompozit tozların üretimi sağlanır. Fakat statik bir yük altında tozların homojen bir şekilde ve gözeneksiz olarak dağılımlarını sağlamak mümkün değildir. Sertleşme sırasında tane büyümesine katkıda bulunan iki önemli faktör vardır; bunlar yüksek sıcaklıklar ve sertleşme sıcaklığına maruz kalma süresidir. Böylece bu iki parametrenin dikkatli kontrolü ile istenilen mekanik özellikleri elde etmek mümkündür [117]. Metalik toz işleme teknolojisi açısından toz üretimi, toz karışımı hazırlama, toz karakterizasyonu gibi metalik/alaşım toz karakteristikleriyle, presleme ve sinterleme gibi işlem kademeleri, nihai ürünün tüm özelliklerini doğrudan etkilemektedir. Genel akış şeması açısından basit seviye bir üretim teknolojisi gibi görünen bu yöntem, özünde birçok parametrik ilişkiler barındırmakta olup ürünün mikro yapı üzerinden mekanik

ve fiziksel-kimyasal özelliklerine doğrudan kuvvetli bir etkisi vardır [118]. Şekil 4.1 temel metalik toz işleme teknolojisinin üretim kademelerini göstermektedir.



Şekil 4.1. Metalik toz işleme akış şeması [118]

Şekil 4.2’de tozların geleneksel üretim aşamaları verilmiştir. Sıkıştırma ve sinterleme işleminin başarılı olabilmesi için metal tozların önceden homojen olmaları gerekmektedir.

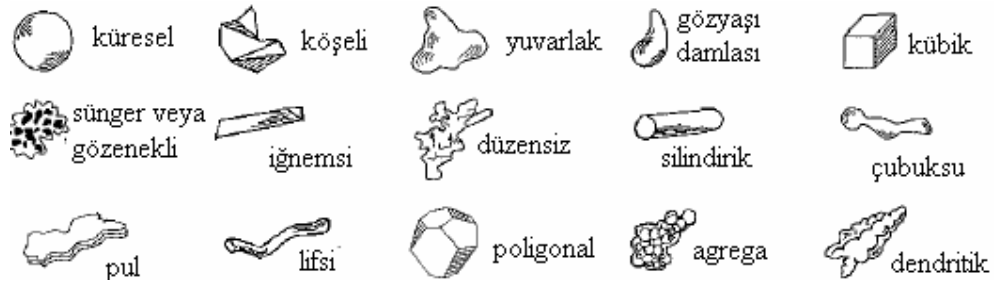


Şekil 4.2. Tozların üretim aşamaları [66]

a) Karıştırma, b) Presleme, c) Sinterleme

4.2. Toz Üretimi

Toz metalurjisi ürünlerinin ana hammaddesi tozlardır. Üretilmesi planlanan şekli ve işlevi (fonksiyonu) yerine getirecek olan parçaların istenilen özelliklerde ve mukavemet değerlerinde üretilebilmesi için arzu edilen niteliklerde tozlara ihtiyaç duyulmaktadır. Bir tozun hangi yöntemle üretildiğinin bilinmesi o tozun tane boyutu, boyut dağılımı ve şekli gibi fiziksel özellikleri ile kimyasal safiyeti ve safsızlık nitelikleri hakkında kullanıcıya ön fikirler verebilir. Tozu üretilecek malzemenin ergime sıcaklığı, gevrek veya tok oluşu, bileşik veya saf halde bulunuşu gibi önemli birkaç faktör göz önünde bulundurularak toz üretim tekniği belirlenir [7]. Şekil 4.3’de toz metalurjisindeki muhtemel parçacık şekilleri verilmiştir.



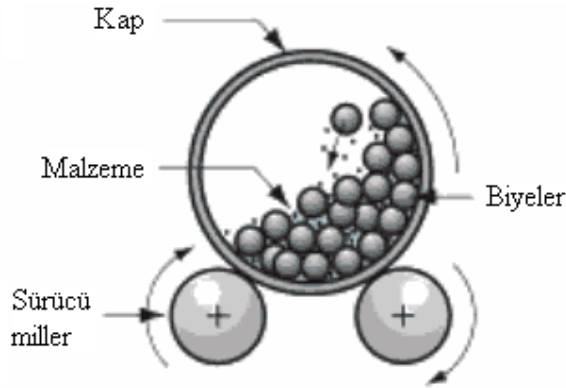
Şekil 4.3. Toz metalurjisindeki muhtemel parçacık şekilleri [119]

Hemen hemen her türlü metal toz formunda üretilebilir. Tozların ticari olarak üretilmesinde genel olarak üç yöntem kullanılır. Metal yüzey alanının artırılması için enerji verilmesi gerekir [120]. Bunlar, ilgili malzemenin sıvı veya katı fazda küçük parçacıklara ayrıştırılması esasına dayalı mekaniksel yöntemler, bileşik formdaki malzemelerin indirgenmesi prensibine dayalı kimyasal yöntemler ve yine bileşik formdaki malzemenin ayrıştırılması prensibine dayalı elektro-kimyasal yöntemler olmak üzere üç ana grupta değerlendirilmektedir [7].

4.2.1. Mekanik üretim yöntemleri

Öğütme

Öğütme, sert bilyeler, çubuklar veya çekiçler kullanılarak yapılan mekanik darbe işlemini kapsar ve gevrek malzemelerden toz üretmede kullanılan klasik bir yöntemdir [119]. Sert ve kırılğan malzemelerin yanı sıra sünek ve yumuşak malzemelerin mekanik olarak parçalara ayrılması toz üretiminde uzun zamandır yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir [111]. İç içe olan aynı kimyasal yapıda fakat farklı parçacık boyutlarında tozlar birbirine benzetilir [66]. Öğütme işleminde kullanılan en basit cihaz içerisinde bilyeler ve öğütülecek malzeme doldurulan kavanoz öğütücü değirmendir [119]. Şekil 4.4'te öğütücü değirmen ile toz üretimi görülmektedir.

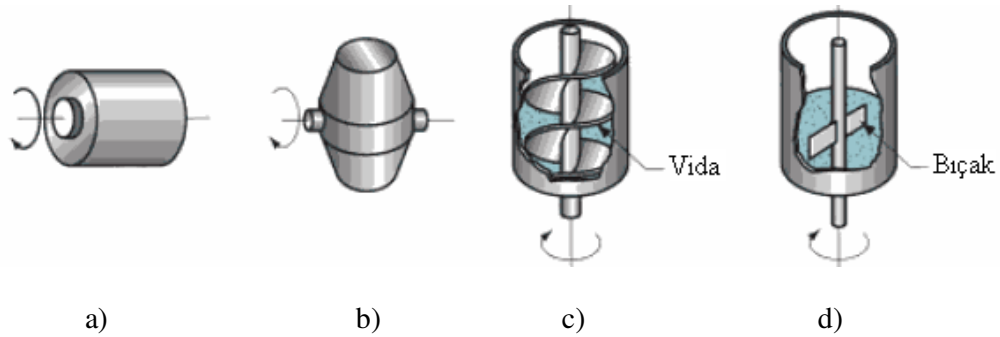


Şekil 4.4. Öğütme yöntemiyle toz üretimi [66]

Metaller arası bileşikler, demir alaşımları, demir-krom, demir-silisyum vb. gibi kırılğan malzemeler mekanik olarak bilyalı değirmenlerde öğütülürler. Fakat öğütme işlemi bir çok sünek metal için uygun değildir. Çünkü bu metaller kolayca kırılmazlar. Sünek tanecikler kırılma yerine birbirleri ile soğuk olarak kaynaklanır ve daha büyük tanecik oluştururlar. Günümüzde öğütme işlemi alüminyum gibi sünek metallere pul toz üretiminde de kullanılır. Bu durumda, soğuk kaynaklanmayı ve yapışmayı engellemek için yağlayıcılar kullanılır [115].

Aşındırarak öğütme ve mekanik alaşımlama

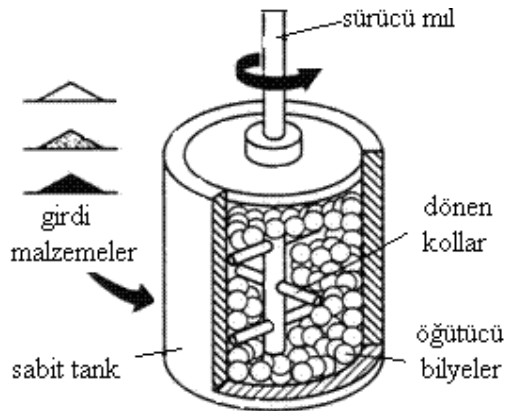
Oksit dağılımı ile güçlendirilmiş malzemeler parçacık takviyeli kompozitlerde yüksek sıcaklık sürünme dayanımı nedeniyle uzun zamandır kullanılmaktadır. Bu kompozitlerin üretiminde her yerinde sert parçacıkların homojen dağılımını elde etmek zordur. Hareketli bilyeler arasındaki aşındırma ile alaşımlı kompozit parçacıkları üreten MA, başarılı bir tekniktir [119]. Mekanik alaşımlama farklı kimyasal yapıdaki tozların birleştirilmesini ifade eder [66]. TM teknolojisi, değişik metallerin, diğer yöntemlerle imal edilmeleri çok zor hatta olanaksız olan alaşımlarla karışmasını sağlar. Şekil 4.5’de farklı öğütme ve karıştırma makineleri görülmektedir



Şekil 4.5. Değişik öğütme ve karıştırma makineleri [66]

a) Dönen tambur, b) Dönen çift koni, c) Vidalı mikser, d) Bıçaklı mikser

Mekanik alaşımlamanın şematik gösterimi Şekil 4.6’da görülmektedir.



Şekil 4.6. Mekanik alaşımlamanın şematik gösterimi [119]

Dönen kollar bilye dolu tankı karıştırmakta ve girdi malzemeleri sırasıyla soğuk kaynak ve kırılma adımlarını izlemektedir. Diğer mekanik toz üretim tekniklerinde olduğu gibi mekanik alaşımlamada da kirlilik sorun olabilir. Bilyeler, karıştırma mili, kollar ve tank, öğütülecek toz ile aynı malzemeden yapılarak kirlilik en aza indirilebilir [119].

4.2.2. Atomizasyon yöntemleri

Atomizasyon, bir sıvının çok küçük damlacıklara ayrılması olarak tanımlanır. Metal damlacık daha sonra katılaştır ve tozu oluşturur. Atomizasyon, ergimiş metali basınçlı bir jet vasıtası ile püskürtme, dönen bir disk üzerine akıtma, elektrostatik veya ultrasonik olarak gerçekleştirilebilir. Sıvı metal demetinin parçalanmasında basınçlı akışkan olarak su veya gaz kullanılmaktadır [115]. Atomizasyon metal tozu üretiminde kullanılan en yaygın toz üretim yöntemidir. Bu üretim tekniği üç ana bölüme ayrılır [7]. Bunlar aşağıdaki gibi sıralanabilir:

1. Ergitme,
2. Atomizasyon (eriyik metal damlalarını daha küçük boyutlarda parçalamak),
3. Katılma ve soğuma.

Bu işlemlerden sonra çoğu zaman yüzey oksitlerinin azaltılması, gazlardan uzaklaştırma ve toz boyutu dağılımı gibi ürünün istenen niteliklere getirilmesi için ek işlemler yapılmaktadır. Enerjinin sıvı metali parçalama yöntemi atomizasyonda ana sınıflama kriterini teşkil etmektedir [7].

Gaz atomizasyonu

Bu yöntem, ergimiş metal damlacıklarının sprey halinde katılarak toz haline dönüştürülmesini içerir. Günümüzde metal tozlarının üretilmesinde saf metallerin yanı sıra tüm metaller ve alaşımlara uygulanan çok yönlü popüler bir yöntemdir [66]. Gaz atomizasyonu, en çok tercih edilen atomizasyonla toz üretim sistemlerinde ikinci sıradadır. Hava, azot, argon ve helyum arzu edilen özellikler göz önünde

bulundurularak metal eriyik sıvısını parçalanması ve soğutulması için kullanılırlar [7]. Yüksek hızlı gaz jeti, erimiş metali aşağıdan emen (sifon) ve bir kap içine püskürten bir genişleme nozulun içinden akar. Damlacıklar toz halinde katılır. Ergimiş metal bir nozul boyunca yer çekimi kuvveti ile akar ve hava jetleri tarafından atomize edilir [118]. Jet tasarımı ve yapılandırması, atomize tozun basıncı ve hacmi, akan sıvının kalınlığı ve diğer bazı parametreler değiştirilmek suretiyle parçacık boyut dağılımını istenilen oranlarda değiştirmek mümkün olabilmektedir [7]. Parçacık boyutu ile hız ters orantılıdır [66].

Su atomizasyonu

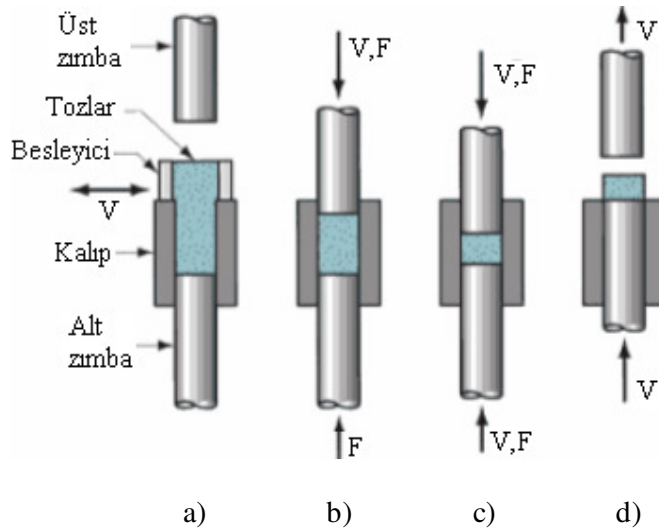
Bu yöntemde havanın yerine yüksek hızlı su akışı kullanılır. Su atomizasyonunun verimliliği gaz atomizasyon ile aynı düzeyde olmakla birlikte işletim ve ürün maliyeti daha düşüktür [7]. 1600 °C eriyen metallerde çok yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Soğutma hızlı olduğundan toz şekilleri küreselden ziyade düzensiz bir yapıda oluşur. Su atomizasyonunun kullanımının dezavantajı parçacık yüzeylerinde sudan dolayı oksidasyon oluşumudur. Son yıllarda oksidasyonu engellemek için suyun yerine sentetik yağlar kullanılmaktadır [66]. Su atomizasyon yöntemi ile elde edilen tozların genelde ortalama tane boyutu 30~1000 µm arasında olmaktadır. Süreç parametrelerinin değiştirilmesi suretiyle toz şekli farklılık gösterebilir [7]. Su gaza göre çok az sıkıştırılabilirliğe ve daha yüksek yoğunluğa sahip olduğundan, eriyik demeti ile su nozulu arasındaki mesafe çok önemli bir etken değildir [110].

Savurmalı atomizasyon

Savurmalı atomizasyon, metal tozu üretmek için hızlıca dönen disk üzerine sıvı metalin dökülmesi yöntemidir [66]. Savurmalı atomizasyon, ergiği döndürülmesi sonucu oluşan mekanik kuvvet (merkezkaç kuvveti) etkisi ile damlacıkların katılması ile parçacıkların oluşturulması esasına dayanır [111].

4.3. Tozların Sıkıştırılması

Tozların sıkıştırılmasında genellikle kalıp çeliklerinden yapılan düşük hata paylı kalıplar kullanılmaktadır. Emniyet ve esnekliklerinden dolayı sıkıştırma işlemlerinde yaygın olarak hidrolik veya mekanik presler kullanılır. Toz tipi ve özellikleri de sıkıştırma basıncı üzerinde etkilidir [111]. Presleme esnasında kalıpta oluşan hareketler Şekil 4.7’de sırasıyla gösterilmiştir.



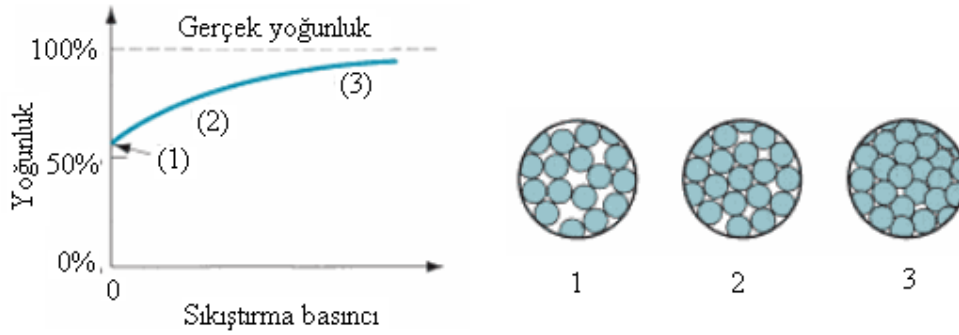
Şekil 4.7. TM’de preslemenin aşamaları [66]

- a) Kalıbın otomatik besleyici tarafından tozla doldurulması, b) Presleme sırasında alt ve üst zimbaların hareketi, c) Son şeklin verilmesi, d) Parçanın çıkarılması.

İlk olarak kalıpta sıkıştırma çevriminde, alt zimba doldurma konumunda iken kalıp boşluğuna tozlar doldurulur. Besleme pabucunun geri çekilmesinden sonra ölçülü toz miktarı presleme konumuna çekilir. Üst zimba kalıba girer, alt ve üst zimbalar merkeze doğru ilerletilir. Sıkıştırmadan sonra, üst zimba geri çekilerek alt zimba çevrimin tekrarından önce parçayı çıkarır [119]. Kalıp içerisindeki tozun başlangıç yüksekliği (bu tozun şekli ve tane boyutu dağılımı ile ilgilidir) sıkıştırılabilirliğinde belirleyici rol oynar. Tozun kalıp içerisine sorunsuz ve hızlı akması da önemlidir. Toz boyutu ve şekli tozun kalıba akış hızına da önemli derecede etki eder. Örneğin toz tanelerinin çok ince oluşu toz akış hızının ve basma yoğunluğun düşük olmasına neden olur. Toz dağılımı ise kalıpta basılan tozun yoğunluk dağılımının homojen

olup olmamasına etki eder. Bununla birlikte ortalama tane boyutu küçük olan toz malzemelerin sıkıştırılabilirliği yüksek olmaktadır [7]. Tozların sıkıştırılmasındaki ana amaç görünür yoğunluk ve dayanımın elde edilmesidir.

Sıkıştırma bir yük altında serbest yapıdaki toz parçacıklarının istenilen şekle ve forma dönüştürülmesi için yoğunluk kazandırma işlemi olarak tanımlanabilir. TM üretim yöntemi ile elde edilen malzemenin dayanımı basma ve sinterleme sonrası yoğunluğu ile doğrudan ilgilidir. Sinterlemede esas olan istenilen yoğunluğun (çoğu zaman tam yoğunluk) ve dolayısıyla fiziksel dayanımın elde edilmesidir (Şekil 4.8). İdeal yoğunluk %100 teorik yoğunluğa erişmektir [7].



Şekil 4.8. Sıkıştırma sırasında uygulanan basıncın etkisi 1 doldurmadan sonraki gevşek tozlar; 2 yeniden paketlenmiş tozlar; ve 3 parçacıkların deformasyonu; ve tozların yoğunluğunun, basınca bağlı olarak değişimi [66]

Şekil 4.11'deki sıkıştırma aşağıda belirtilen aşamalarda gerçekleştirilir:

1. Sıkıştırma basıncının ilk uygulanmasına müteakip parçacıkların yer değiştirmesi ve yeniden pozisyon belirlemesi gerçekleşir. Plastik şekil değiştirme yoktur. Kısmi olarak bazı parçacıklarda mekaniksel kırılmalar olabilir. Bu aşamada parçacık boyutu, toz boyut dağılımı, parçacık şekli ve yüzey özellikleri ile parçacıklar arası sürtünme önemli rol oynar.
2. Toz sıkıştırmanın ikinci aşamasında elastik ve plastik deformasyon faktörleri baskındır. Bu aşamada parçacıklar arası soğuk şekillendirmeye bağlı bağlar oluşabilir. Ayrıca parçacıkların mekaniksel kilitlemeleri ile parçacık-parçacık etkileşimleri bu aşamada önem kazanan durumlardır.

3. Presleme basıncının arttığı sıkıştırmanın son aşamasında toz parçacıklarının kırılması ve plastik deformasyon ile boşlukların doldurulması sağlanmış olur. Bu aşamada toz parçacıkları arasında soğuk kaynak olabilir [7].

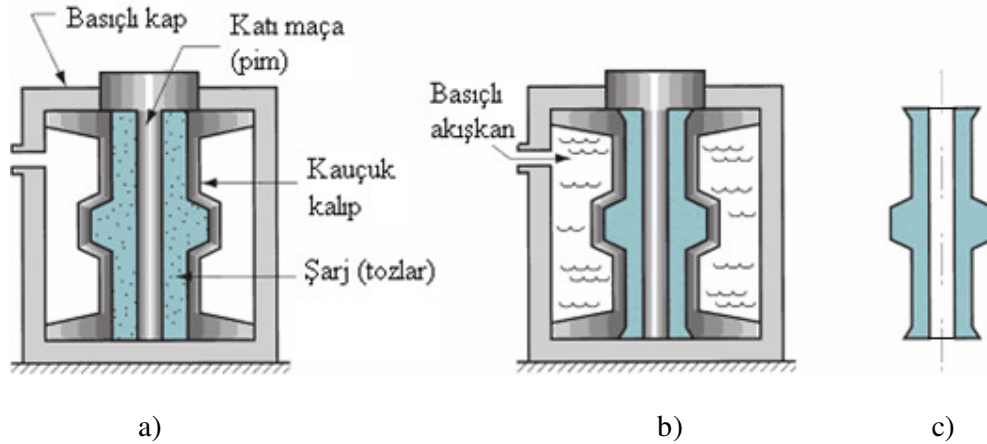
4.3.1. İzostatik presleme

Tozların kalıp içerisinde tek yönlü basılmasında, hareketli piston ile kalıp yüzeyi ve tozlarla kalıp yüzeyi arasında meydana gelen sürtünme nedeni ile uygulanan gerilme tüm tozlara eşit olarak iletilmez. Bu durum özellikle *aspekt* oranı (L/D ; L =Yükseklik, D =Genişlik) büyük olan parçalarda homojen olmayan yoğunluk dağılımına neden olur. Parça iç yapısındaki homojen olmayan bu yoğunluk dağılımı nedeniyle basılmış parçalar sinterleme sırasında farklı boyutsal daralma miktarları nedeniyle şekilsel deformasyonlara maruz kalabilirler. Bunun giderilmesi için düşük gerilmeler altında basılan numuneler soğuk veya sıcak izostatik basma denen ve yüksek gerilme altında bir akışkan yardımı ile sıkıştırma sağlayan sistemlerde homojen dağılımlı ve yüksek yoğunluklu parçalara dönüştürülebilirler [7]. İzostatik presleme, bir toz kütesine veya ön şekillendirilmiş bir parçaya bütün yönlerden eşit şekilde basınç uygulaması ile gerçekleştirilen bir şekil verme yöntemidir. İzostatik preslemede eşit basınç uygulaması ile taneler arasındaki temas noktaları artarak reaksiyonun ilerlemesi hızlanmaktadır. Bu yöntem ayrıca kalıp iç yüzeyi ile sürtünmeyi de azaltmaktadır. Oda veya ortam sıcaklığında yapılan izostatik presleme soğuk izostatik presleme olarak isimlendirilirken, yüksek sıcaklıkta yapılan izostatik presleme ise sıcak izostatik presleme olarak bilinmektedir [121].

Soğuk İzostatik Presleme

Soğuk izostatik presleme, esnek bir kalıbın içerisine tozların doldurulması, su veya yağ gibi bir akışkan yardımıyla da preslenmesidir [122]. Soğuk izostatik presleme basıncın sürekli ve her yönden eşit olarak uygulandığı bir sıkıştırma yöntemidir. Bu yöntemde tozlar kalıp olarak hizmet eden esnek bir elastik kap içerisine yerleştirilir. Sıkıştırma işlemi oda sıcaklığında gerçekleşir. Kalıbın büzülebilmesi için kauçuk veya diğer elastomer malzemeler kullanılır [66]. Kalıp basınç kabının içindeki bir

sıvı ortamına daldırılır ve böylece sıvıya uygulanan yüksek basınç sıvı yardımıyla sıkıştırılacak tozlara iletilerek, tozlar üzerinde bir hidrostatik basınç oluşturulur. Daha sonra kalıp basınç kabından çıkarılarak her bir parçanın kalıptan boşaltılması sağlanır. Sıvı ortam olarak su, yağ veya gaz kullanılabilir [121]. Soğuk izostatik preslemenin aşamaları Şekil 4.9'da görülmektedir. Yaş veya hareketli kalıp (wet bag) olarak adlandırılan bu yöntem alternatif bir diğer yöntem ise kuru kalıp veya sabit kalıp (dry bag) yöntemidir. Sabit kalıp yöntemi elastik kalıbın sürekli olarak basınç kabında sabit bir şekilde kalmasını ifade etmektedir.



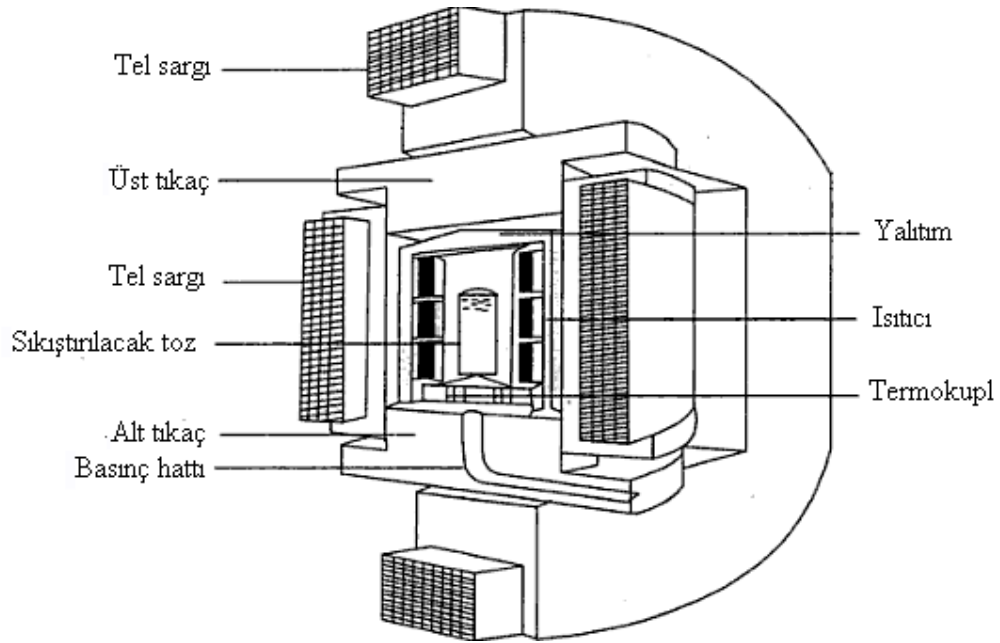
Şekil 4.9. Soğuk izostatik preslemenin aşamaları [66]

- a) Tozların esnek kalıp içerisine konulması, b) Hidrolik basınç ile tozların sıkıştırılması, c) Preslemenin durdurulması ve ürünün çıkartılması.

Genellikle bu yöntem büyük hacimli parçaların (kare, dikdörtgen, hegzagonal tüp veya çubukların) üretilmesinde kullanılmaktadır. Fakat bu yöntemde bir defada sadece bir parça üretmek mümkündür. Hareketli kalıp yöntemi ise bir çok avantajlarından dolayı tercih edilmektedir. Sıkıştırma işlemi bir izostatik ortamda gerçekleştiği için basınç homojen bir şekilde dağılmakta ve böylece düzenli bir yoğunluk elde edilmektedir. Tek eksenli preslerin aksine kalıp duvarı ile pres arasında sürtünmeden doğan kalıcı gerilmeler oluşmamaktadır. Ayrıca sürtünme olmadığından herhangi bir bağlayıcı veya yağlayıcı ilavesine de gerek kalmamaktadır. Karmaşık şekillerin son şekle çok yakın oranlarda ve çok küçük hata toleransları ile üretimi mümkündür [121].

Sıcak İzostatik Presleme (SİP)

Tozların tam yoğunlukla sıkıştırmanın yaygın bir yolu da çoğunlukla SİP olarak kısaltılan sıcak izostatik preslemedir [119]. Sıcak izostatik presleme, yüksek sıcaklık ve basınç altında argon ve helyum gibi orta sıkıştırılabilir gazlar kullanılarak gerçekleştirilir. Kalıp yüksek sıcaklıklara dayanabilecek sac metalde yapılır. SİP işleminde sinterleme ve presleme bir adımda gerçekleştirilebilir. Avantajlı görülmesine rağmen gerçekten pahalı bir işlem olmasından dolayı uzay endüstrisi uygulamalarında kullanılır [66]. Şekil 4.10'da sıcak izostatik presleme ünitesinin kesit görünüşlü şematik resmi sunulmuştur.

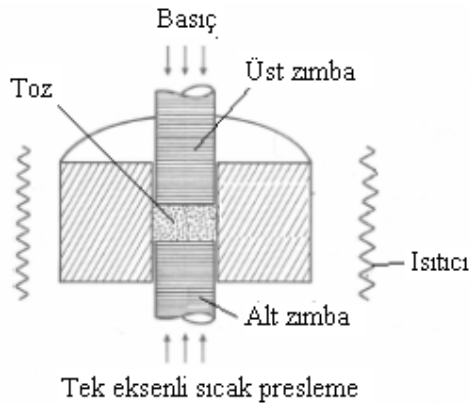


Şekil 4.10. Sıcak izostatik presleme ünitesinin şematik resmi [111]

SİP ile üretilen TM parçalarında yüksek yoğunluk (sıfıra yakın gözeneklilik), parçacıklar arası tam bağlanma ve yüksek mekanik dayanım sağlanır [66]. Yüksek sıcaklık kullanımından dolayı elastomer gibi malzemelerin kullanımını engellemektedir. Sıcak presleme 40~400 MPa basınç aralığında ve 500~2200 °C sıcaklık aralıklarında 2 m çapına kadar numune üretiminde kullanılabilir [111].

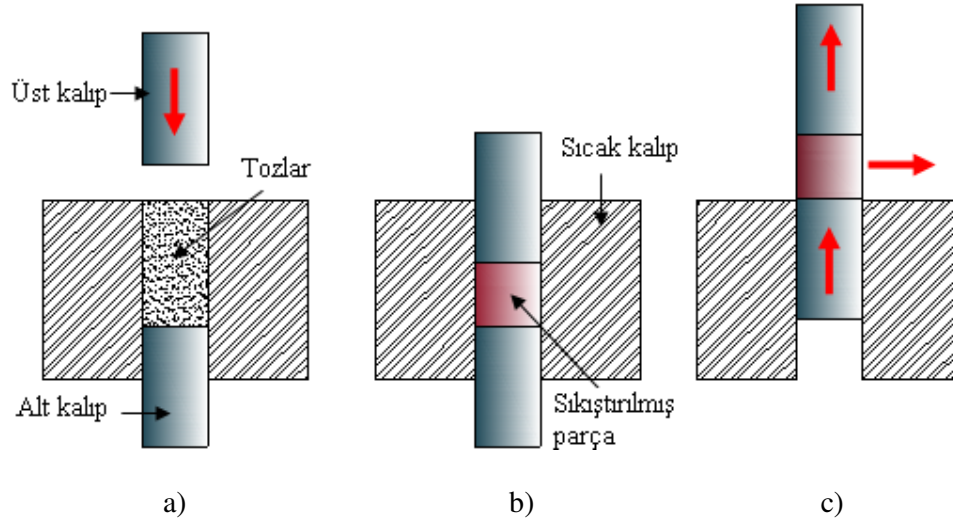
4.3.2. Sıcak presleme (SP)

Sıcak presleme işlemi sıkıştırma ve sinterleme işleminin bir operasyonda gerçekleştirildiği bir süreçtir. Donanım oldukça basittir [123]. Bu süreç tam yoğunluğa veya tam yoğunluğa yakın (%1'den az gözenek) ulaşılmasını sağlar [124]. Sıcak presleme, gerilme destekli yoğunlaşmanın bir ifadesidir. Sıcak presleme işlemi tek eksenli kalıpta gerçekleştirilir. Sıcak presleme sırasında ilk yoğunlaşma, parçacıkların yeniden düzenlenmesi ve parçacık temas noktalarındaki plastik akış ile olur [119]. Sıcak presleme, Şekil 4.11'de gösterildiği gibi rijit bir kalıp içerisinde eş aksenal basınç kullanılarak yapılır. Sistemde alt tabla sabit olabilir. Kuvvet genellikle üst tabla ile hidrolik bir sistem tarafından uygulanır. Uygulanan kuvvet her ne kadar eş aksenal ise de, kalıp yüzeylerinde meydana gelen sürtünme nedeniyle merkezden yanlara doğru değişen bir dağılım gösterir. Buna bağlı olarak meydana gelen aksenal ve radyal yönler arasındaki gerilim farkı, toz yüzeylerinin bozulmasına neden olan bir kayma bölgesi oluşturur [125].



Şekil 4.11. Tek eksenli sıcak preslemenin kesit görünüşü [119]

Sıcak presleme işlemi (Şekil 4.12) tozların kalıp içerisine doldurulması, kalıbın ısıtılması, parçanın sıkıştırılması ve son olarak iş parçasının kalıp içerisinden çıkarılması olmak üzere üç aşamadan oluşmaktadır.



Şekil 4.12. Sıcak presleme işlem basamakları

a) Kalıbın dolumu, b) Sıcak presleme, c) Parçanın çıkartılması

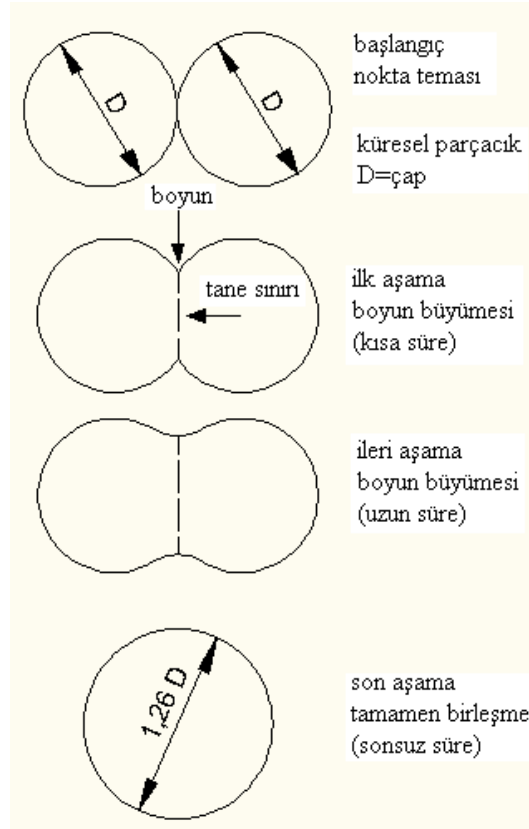
Sıcak presleme döngüleri, kalıpla sıkıştırmaya oranla daha yavaştır. Büyük ısı kütlelerden dolayı döngü zamanı saatler ile ölçülür. En yüksek sıcaklık kalıp malzemesine bağlıdır ve 2200 °C'ye kadar olabilir. Uygulanan en yüksek basınç ise 50 MPa'ya kadar çıkabilir. Parçanın kirlenmesini engellemek için genellikle vakum ortamı tercih edilir [119]. Sıcak presleme işleminde üç ayrı ısıtma tekniği kullanılmaktadır. Bunlar indüksiyon ile ısıtma, endirekt dirençli ısıtma ve doğrudan dirençli ısıtmadır. İndüksiyon ile ısıtma işleminde, yüksek frekanslı akım ile kalıp içerisindeki tozların ısıtılması esasına dayanır. Endirekt dirençli ısıtma tekniğinde, kalıp ısı bölmesine konumlandırılır. Isı bölmesi elektrik akımı ile ısıtılan grafit ısıtma elemanlarıyla ısıtılır. Doğrudan dirençli ısıtma tekniğinde, kalıp doğrudan elektrik gücü ile ısıtılır. Kalıp ve toz parçanın direnci ile ısı tam olarak kalıpta oluşur. Sonuç olarak ısıtma hızı çok yüksektir. Önceki iki teknik ısı iletimi ile ilişkili iken doğrudan dirençli ısıtma teknolojisinde ısı ihtiyaç duyulan yerde üretilmektedir [126].

4.4. Sinterleme

4.4.1. Katı hal sinterleme

Sinterleme termal enerji uygulanarak metal veya seramik tozlarından yoğunluk kontrollü malzeme ve bileşenler üretmek için kullanılan bir işlemdir [127].

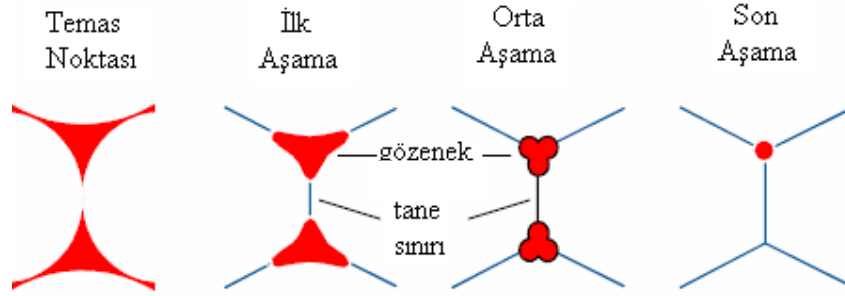
Sinterleme, birbirine bağlanan parçaların yüksek yoğunlukta bağlanmasını sağlar. Bu bağlanma, ergime sıcaklığının altında katı halde atom hareketleri ile oluşabilir. Sinterleme yüksek sıcaklıkta atomların yayını ve küçük parçaların yüzey enerjisinin azalmasıyla gerçekleşir. Sinterleme işleminin ilk aşaması, her parçacık üzerinde birkaç noktada boyun büyümesi ile tanımlanır. Fakat boyunlar birbirinden bağımsız olarak büyür. Bu durum Şekil 4.13’de görülmektedir.



Şekil 4.13. Sinterlemede nokta teması ile başlayan ve parçacıklar arası bağ gelişimini gösteren iki küre sinterleme modeli [119]

Sıkıştırma olmadan parçacıklarda temas küçük noktalar ile başlar. Başlangıçta gözenekler düzensiz ve köşeli şekildedir. Boyun zamanla dış bükey bölgedeki atomlar tarafından doldurulan bir içbükeyliği temsil eder. Boyun büyüdükçe kavis azalır ve işlem yavaşlar. Sinterlemenin ara aşamasında gözenekler yuvarlaklaşır, fakat gözenekler etrafındaki kavis kütle transferi için itici güç oluşturmaya devam ederek içbükey bölgeleri doldurur. Sinterlemenin ara aşamasında, boyunlar birbiri ile etkileşecek, örtüşecek ölçüde büyümüştür. Her ne kadar gözenekler yuvarlaşıp düzgün hale gelse de hala dışa açıktırlar. Diğer bir ifade ile akışkanlar ham parça

içine girip çıkabilir. Sinterlemenin ilerlemesi ile taneler büyür ve gözenekler küçülür. Sinterlemenin son aşamasında gözenekler kapalı ve küreseldir [119]. Temel olarak sinterleme işlemi katı hal sinterleme ve sıvı hal sinterleme olmak üzere iki bölüme ayrılır. Sinterlemeyi belirleyen önemli değişkenler sıkıştırılan tozun mikro yapısı malzeme ve işlem değişkenleri olmak üzere iki kategoriye ayrılabilir. Malzeme ile ilgili değişkenler sıkıştırılan tozun kimyasal bileşimi, toz boyutu, şekli, tozların yığılma derecesini içermektedir. Bu değişkenler tozun sıkıştırılabilmesi ve sinterlenmesi üzerinde etkilidir. Özellikler birden fazla tozun homojen olarak sıkıştırılması için önemlidir. Sinterlemeyi etkileyen diğer değişkenler sıcaklık, basınç, ısıtma ve soğutma süreleri gibi değişkenlerdir. Sinterleme çalışmalarında birçok önceki araştırmacı sıkıştırılan tozların sinterleme sıcaklığı ve basıncının sinterleme üzerindeki etkilerini araştırmışlardır [127]. Sinterleme işlemi (Şekil 4.14) ilk olarak boyun oluşumu ile başlar, geometrinin değişimi ve yoğunlaşma çekmesi ile devam eder ve porozitenin azalması ve gözeneklerin izolasyonu ile sonlanır.



Şekil 4.14. Sinterlemenin basamaklarına göre gözenek yapısındaki değişim [110]

Toz kütlelerinde, sahip oldukları büyük yüzeylerden dolayı yüzey enerjisi bulunur. Bununla birlikte, bu enerji çok fazla değildir. 1 μm çapında küresel bakır tozunun 1 mol gramının yalnızca yaklaşık 10 kalori fazla enerjiye sahip olduğu hesaplanmıştır. Sinterleme sırasında tozların birbiriyle bağlanması ve toz yüzeylerinin düzelmesiyle yüzey alanları azalır ve böylece yüzey enerjisi de azalır. Sinterlemenin oluşabilmesi için atomların yeterli akıcılığa sahip olması gerekir. Atomik akıcılık sıcaklığın bir fonksiyonu olduğundan, sinterleme önemli derecede sıcaklığa bağlıdır. Sinterleme işlemi, yüzey enerjisi ile alakalı olduğundan ince ve düzensiz tozlar için kaba küresel tozlara göre daha çok enerji harcanır [128].

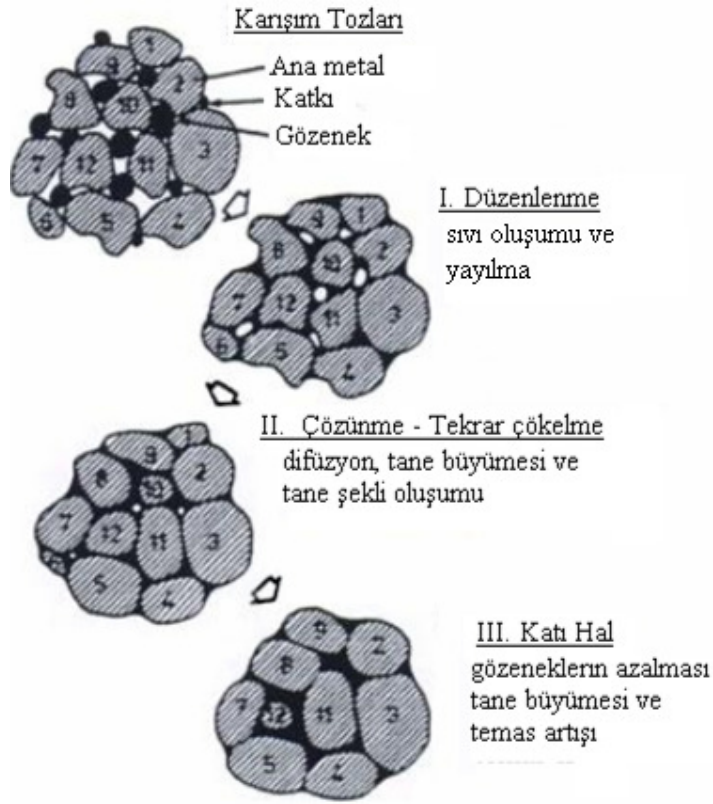
Mekanizmalar ve Aşamalar

Sinterlemenin itici gücü yüzey enerjisinin azaltılmasıdır. Rastgele atom hareketleri sırasında, atomlar mikroyapıdaki boşlukları doldurur. Kavisli yüzeylerin atom yerleşmeleri üzerine etkisini göstermenin bir yolu gerilmeye bakmaktır [119].

Sinterlemenin ana mekanizmaları yüzey ve hacim difüzyonudur. Difüzyon ile katkı maddelerinin demir içine difüze olmaları sağlanır. Termodinamik kurallarına göre enerjiyi minimize edebilmek için porozitelerin yuvarlanması ve küçüklerin büyüklerin gelişimine yardımcı olabilmek için kaybolduğu gözlenir. Sinterleme fırınının soğutma bölgesinde, parçaların hava ile temas ederek oksitlenmelerini engellemek amacıyla oksitlenmeden koruyucu bir gaz altında soğumaları sağlanır [128].

4.4.2. Sıvı hal sinterleme

Sinterleme sırasında sıvı faz oluşumu sinterleme hızını büyük ölçüde artırır. Esas olarak sıvı faz taneleri birbirine bağlayan ve içinde hızlı yayılımının olduğu hızlı lehimini oluşturur. Sıvı faz sinterleme için temel gereksinim ıslatmadır [119]. Sıvı faz sinterlemesi Şekil 4.15’de görüldüğü gibi üç aşamadan oluşmaktadır. Başlangıçta tozlar sıvı forma ulaşacağı bir sıcaklığa kadar ısıtmak gerekir. Sıvı oluşumu ile yoğunlaşma hızlı bir şekilde başlar ve katı parçacıkların üzeri sıvı tarafından uygulanan kılcal kuvvet etkisiyle ıslatılır. Yüzey enerjisi en aza indirilerek gözeneklerde yok edilmiş olunur. Gözeneklerin azalması ile viskozite artar. Sonuç olarak yoğunlaşma oranı sürekli olarak azalır. Tekrar çökme ile yoğunlaşmanın miktarının artması sıvının miktarı, parçacık boyutu ve sıvı katı çözünürlüğüne bağlıdır. Genellikle küçük parçacıklar daha iyi tekrar çökler. Eğer yeterince sıvı oluşursa, tam yoğunluk (sıfır gözenek) tekrar çökme ile mümkün olur [129].



Şekil 4.15. Karışım tozlarının sıvı faz sinterleme ile klasik üretimi aşamaları [129]

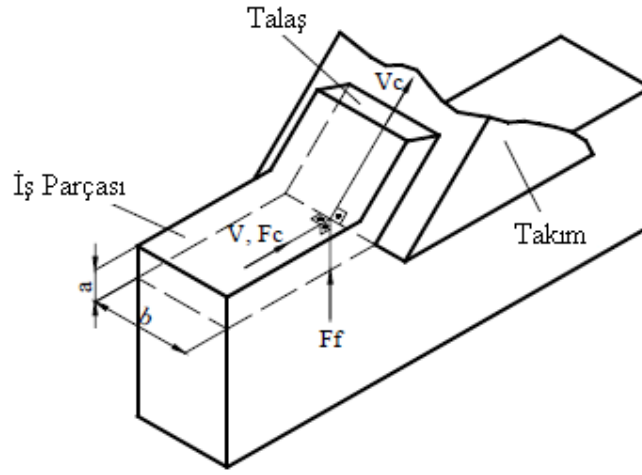
Ancak, düşük çözünürlüklü veya iri taneli sistemlerde yoğunlaşma yavaştır. Sıvının hacim oranı arttıkça gözenekleri dolduracak sıvı miktarı daha fazla olduğundan yoğunlaşmada kolaylaşır. Eğer sıvı yoksa, sinterleme katı-hal işlemleri ile gerçekleşir. Fazla sıvı olması durumunda ise (yaklaşık %35 hacim oranı) sıvı oluşumu ile birlikte taneler arasındaki bütün gözenekler dolar. Ancak, bu durumda ham parça şeklini koruyamayabilir. Ara sıvı oranlarında ham parça şeklini korur, ancak katı taneleri doldurmak için arasında yeterli boşluk yoktur. Bu tür durumlarda, toz karışımındaki kimyasal gradyanlardan dolayı sinterleme ısıtma sırasında oluşur. Sıvı fazlı sinterleme ile aktifleştirilmiş sinterleme benzerdir. Her ikisinde de sinterleme sıcaklığında hızlı kütle taşınımı için kısa-devre yolu olarak ikinci bir faz kullanılır. Aralarındaki en önemli fark sıvı fazlı sinterlemedeki ikinci faz oranının daha fazla olmasıdır [119].

5. TALAŞLI İMALAT ve İŞLENEBİLİRLİK

Çoğu mühendislik malzemeleri metaller, seramikler ve polimerler olmak üzere temel olarak üç sınıfa ayrılır. Kimyasal ve fiziksel özelliklerinin farklı olmasından dolayı bu malzemelerin üretiminde kullanılan imalat süreçleri de farklılık gösterir [66]. Talaş kaldırma, fiziksel bakımdan kesici takım ile iş parçası arasındaki kesme ve ilerleme hareketi sonucunda elastik ve plastik şekil değiştirmeye dayanan sürtünme, ısı oluşumu, talaşın kırılması, takım ucunun aşınması gibi olayların meydana geldiği fiziksel ve karmaşık bir olaydır. Bu, ancak takıma uygulanan kuvvetin yeterli ve kesici takım malzemesinin iş parçası malzemesinden daha sert olmasıyla gerçekleşir [130-132]. Talaş kaldırma yöntemi; dövme, döküm ve toz metalurjisi gibi yöntemlerle ulaşılamayan şekil ve hassasiyete sahip parçaların elde edilmesi için kullanılmaktadır [133]. Son yıllarda ürünlerin nihai şekle yakın üretim tekniklerinde önemli gelişmeler olmasına rağmen halen imalatta endüstriyel uygulamalarda talaş kaldırma ana bir faktördür [134]. Modern talaşlı imalat işlemlerinde yapılan işlem ve kaldırılan talaş hacmi ne olursa olsun kontrollü bir talaş oluşumu şarttır. Talaş kaldırma işleminin anlaşılabilmesi değişik tipteki metallerin talaşa dönüşmeleri esnasındaki davranışlarının anlaşılmasına bağlıdır [135]. Talaş kaldırılırken iş parçası malzemenin kesilmeye karşı gösterdiği dirence, işlenme kabiliyeti (talaş kaldırma kabiliyeti) adı verilmektedir. Talaş kaldırma kabiliyeti, kaldırılan malzeme ve talaş miktarına, kesici takımın özelliklerine, işleme süresine ve işlenen yüzey kalitesine bağlı olarak değişen karmaşık bir olaydır [136].

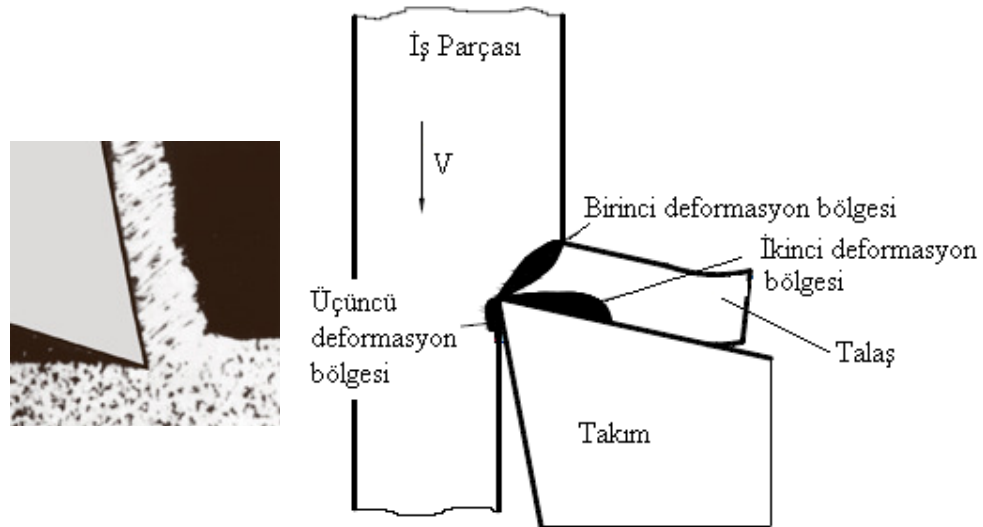
5.1. Talaşlı İmalat Mekanikliği ve Talaş Oluşumu

Talaşlı imalat işlemi gerçekte üç boyutlu ve oldukça karmaşık bir olay olduğu için talaşlı imalat işleminin mekanikliğinin tanımlanmasında iki boyutlu dik kesme (orthogonal) modeli (Şekil 5.1) kullanılır. Bir parça üzerinden talaş kaldırılabilmesi için takımın iş parçasına dalması ve takım veya iş parçasına uygulanan kesme kuvvetinin yeterli olması gereklidir [137].



Şekil 5.1. Dik kesme geometrisi, düzlemsel parçalarda ortogonal kesme [138]

Dik kesmenin (Şekil 5.2) kesit görünüşünden de anlaşılacağı üzere kesme işleminde üç adet şekil değiştirme (deformasyon) bölgesi vardır. Takım kenarı iş parçasına dalarken, takımın malzeme içerisinde hareketiyle bir talaş formu oluşmaya başlar ve ilk kayma bölgesi oluşur. Malzemenin kesilmesiyle talaş kısmen şekil değiştirir ve takımın talaş yüzeyi boyunca hareketiyle ikinci deformasyon bölgesi oluşur. Takımın yan yüzeyindeki sürtünme bölgesinde ise üçüncü bölge meydana gelir [139].



Şekil 5.2. Ortogonal kesmede oluşan deformasyon bölgeleri [140]

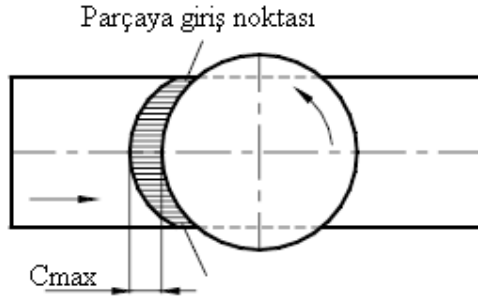
Talaş başlangıçta takımın talaş yüzeyine yapışır ve burada yapışma bölgesi oluşur. Talaşın takım talaş yüzeyinde ilerlediği kayma bölgesindeki gerilme, yaklaşık olarak malzemenin kayma gerilmesine eşittir. Talaş yapışma olayı biter ve sürekli kayma sürtünmesiyle talaş yüzeyinde talaş akışı başlar. Talaş takımdan ayrılır, takımın talaş yüzeyi ile temas kaybolur. Temas uzunluğu kesme hızı, takım geometrisi ve malzeme özelliklerine bağlıdır [139]. Kayma düzlemi iş parçasından kaldırılacak malzemenin talaşa dönüştüğü düzlemdir. Malzeme akar ve talaş oluşur. Bu anlamda ana kesme işlemi kayma düzleminde meydana gelmekte ve önemli ölçüde deforme olmuş ve deforme olmamış talaş kalınlıklarının bir oranı olan kesme oranınca belirlenmektedir [135].

5.2. Frezeleme İşleminin Mekanîği

Frezeleme işlemi çevresinde çok sayıda kesici ağız bulunan takımın dönme hareketine karşılık, iş parçasının öteleme hareketi yapmasıyla gerçekleştirilen bir talaş kaldırma işlemidir. Talaş kaldırma işlemi takım ve iş parçası arasındaki izafi hareketlerin sonucu olarak meydana gelir. Bunlar sırasıyla kesme hareketi, ilerleme hareketi ve yardımcı hareketlerdir. Frezeleme işlemi diğer talaşlı imalat yöntemlerinden farklı olarak kesici takımda bulunan diş sayısına bağlı olarak verimliliği oldukça yüksek bir talaşlı imalat yöntemidir. İş parçası yüzeyinin işlenmesine göre frezeleme işlemleri, çevresel ve alın frezeleme olarak iki genel grupta incelenir . Bir torna takımında bulunan temel kesme açılarının aynısı, freze takımında da bulunur. Esasen bir freze çakısı; bir anlamda, silindirik bir bloğun çevresine, eşit aralıklarla monte edilmiş olan çok sayıda torna uçlarından başka bir şey değildir [137]. Bu nedenle işlem sırasında talaş kesit alanı devamlı değişir. Bunun için tornalama işlemine göre daha kompleks bir yapıya sahiptir [139].

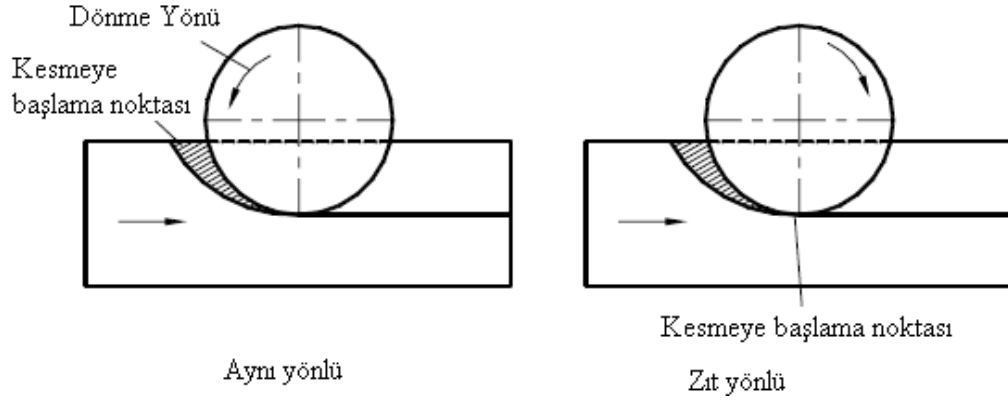
Alın frezelemede, kesici takım eksenine işleme yüzeyine diktir, genel olarak aynı ve zıt yönlü işleme olmak üzere iki yönlü işleme metodu kullanılır. Aynı yönlü frezeleme işleminde iş parçasının ilerleme yönü ile takımın dönüş yönünün aynıdır. Aynı yönlü frezelemede kesici uç, kesme işlemine büyük bir talaş kalınlığı ile başlar. Bu tip frezelemede, daha az ısı oluşumu ve minimum deformasyon sertleşmesi eğilimi

sayesinde, ezme etkisi oluşmaz. Kesme kuvvetleri iş parçasını kesici uca doğru çekerek kesici uç ile iş parçasının sürekli temasta kalmasını sağlar. Zıt yönlü frezeleme işleminde iş parçasının ilerleme yönü ile takımın dönüş yönü terstir. Sıfır talaş kalınlığı ile başlayan karşıt yönlü frezeleme işleminde, freze ile iş parçasını birbirinden ayırmaya çalışan, yüksek kesme kuvvetleri söz konusudur. Sıfır talaş kalınlığı nedeniyle kesici uç parçaya bastırıldığında parçayı kesmez, ezer; dolayısıyla aşırı sürtünme ve sıcaklıklara sebep olur. İşlemede kesici uç bir önceki işlem nedeniyle deformasyon sertleşmesine uğramış yüzeyle temas eder. Silindirik frezelemede kuvvetler iş parçasını yukarı doğru kaldırmaya çalışır [135]. Kesme işlemi kesici dişlerin yan kenarları ile gerçekleşir. Alın frezeleme işleminde kesici takımın boyutu önemli bir faktördür. Eğer işlenen yüzeyin genişliği kesici takımın çapından küçük ise, frezeleme simetrik veya asimetrik olarak yapılır. Şekil 5.3’de görüldüğü gibi simetrik frezeleme, kesici takım eksenini ile iş parçası ekseninin çakışması durumunda yapılan talaş kaldırma olayıdır [141].



Şekil 5.3. Simetrik frezeleme [141]

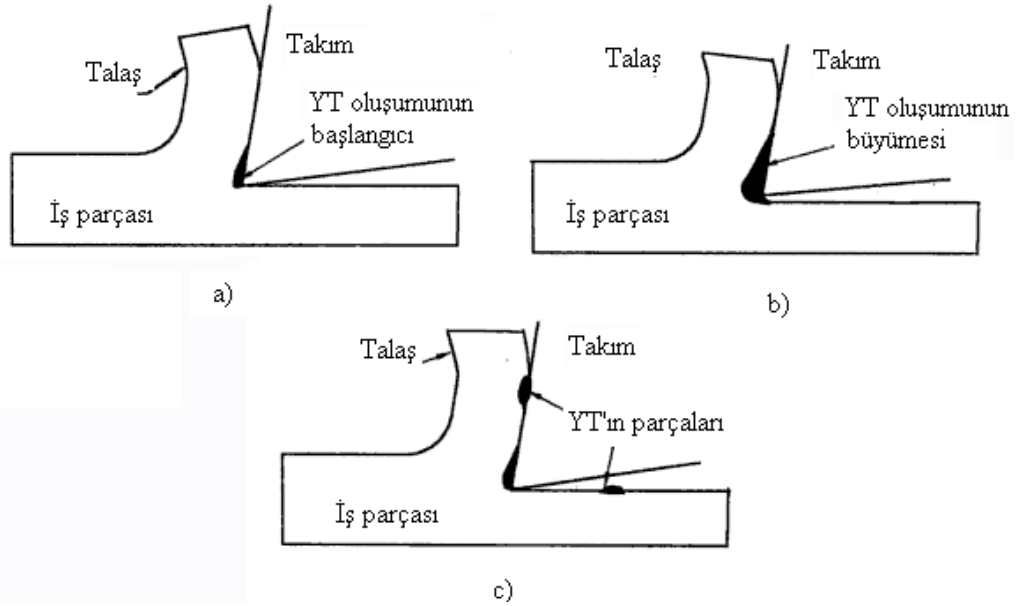
Eğer iki eksen çakışmıyorsa asimetrik frezeleme işlemi gerçekleşir. Şekil 5.4’te aynı ve zıt yönlü asimetrik frezeleme görülmektedir. Kesici takımın çapı iş parçasının işlenen yüzey genişliği (iş parçasının genişliği) ile aynı ise işlem tam kavramalı, eğer iş parçası genişliği daha küçük ise kısmi kavramalı frezeleme adı verilir [141]. Frezeleme işleminde talaş oluşumunun kontrolü son derece önemlidir. Yüksek performans, uzun takım ömrü ve elverişli sonuçlar için, talaş kalınlığı değerlerinin kontrol altında tutulması gerekir [135].



Şekil 5.4. Asimetrik aynı ve zıt yönlü frezeleme [141]

5.3. Yığıntı Talaş Oluşumu

Takım talaş ara yüzeyinde oluşan yüksek sıcaklıklar ve yüksek basınç altında iş parçası malzemesi talaş yüzeyinden serbest bir şekilde talaş formunda uzaklaşmaya başlar. Bu yakın temas nedeniyle bazı talaş parçaları talaş yüzeyine yapışabilir (Şekil 5.5.a,b). YT belli bir kritik değere ulaştığı zaman dağılıbilir veya kırılabilir (Şekil 5.5.c). Bu kırılan parçalar ya iş parçası yüzeyine gömülür veya talaş yüzeyine yapışır. Bu çevrim sürekli olarak devam eder ve iş parçası yüzey kalitesi kötüleşir [142].

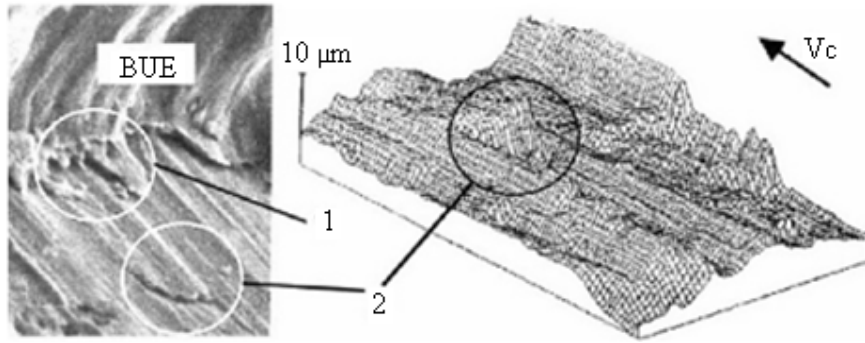


Şekil 5.5. YT periyodik değişimi ve kopması [142]

a)YT oluşumunun başlangıcı, b) YT büyümesi, c) YT kopması

Kesme hızının artırılması ara yüzey sıcaklığını arttıracak ve YT yumuşatacaktır. Kesme hızının artırılması ile YT oluşumu engellenebilir [66, 135, 142]. Birçok araştırmacı yığıntı talaş oluşumunda kesme hızı, pekleşme, takım ve iş parçası arasındaki yapışma eğilimi, mikro çatlak oluşumu, kesici kenarın çevresinden iş parçasının plastik akışı gibi birçok faktöre dikkat çekmiştir. İş parçası ve takım arasındaki yapışma yığıntı talaşın oluşumunda önemli faktörlerden biridir. Kesme bölgesinde oluşan sıcaklıkların ve takımın sıcaklığı iş parçasının ergime sıcaklığından daha düşük olması YT oluşumuna neden olur [143].

Bazı işleme şartları altında genellikle düşük kesme hızlarında takım ve talaş arasındaki şiddetli sürtünme talaşın takım yüzeyine yapışmasına neden olur. Özellikle kaplamasız HSS takımlarda, tornalama, delme, raybalama ve vida çekme işlemlerinde düşük kesme hızlarında yaygın olarak yığıntı talaş oluşumu gözlenir. Yığıntı talaş oluşumundan olumsuz etkilenen temel faktör yüzey kalitesidir [144]. Yığıntı talaş oluşumu ve işlenmiş yüzey üzerinden taşınımı Şekil 5.6'da görülmektedir.



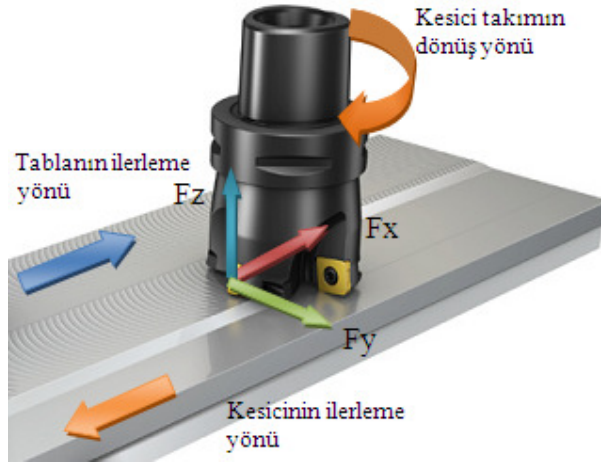
Şekil 5.6. Yığıntı talaş oluşumu ve işlenmiş yüzey üzerinden taşınımı 1) YT'ın kırıldığı yer, 2) İş yüzeyine taşınması [144]

Bazı durumlarda YT kesici uç üzerinden iş parçası malzemesine doğru çıkıntı oluşturarak talaş derinliğini artırır ve düzensiz bir yapıya sahip olan bu çıkıntı yüzey pürüzlülüğünün artmasına neden olur [145].

5.4. Frezede Kesme Kuvvetleri

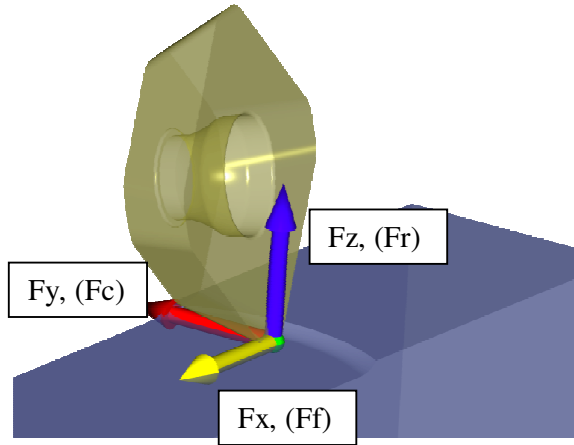
Talaşlı imalat işlemlerinde (tornalama, frezeleme, delme, taşlama, vb.) üretilen iş parçası kalitesinin artırılması ve maliyetin düşürülmesine yönelik yapılan çalışmalarda kesme kuvvetlerinin tespiti ve analiz edilmesi önemli bir yer tutmaktadır [146, 147]. Deforme edilmemiş talaş kalınlığı ve fener mili dönüşü ile her an değişen kesme hızı doğrultusu yüzünden frezeleme işlemi geometrik olarak karmaşıktır [148]. Kesme işleminde talaş bazen takıma yapışarak bir sonraki adıma taşınır ve bu kesme kenarında talaş yığılmasına dolayısıyla kesme kuvvetlerinin artmasına sebep olur. Ayrıca birden fazla kesici ağız kesme işlemine katıldığından, kesme kuvvetlerinde dalgalanma meydana gelir. Frezelemede kesme kuvvetleri; frezeleme tipi, takım konumu, iş malzemesi, takım geometrisi, talaş kalınlığı, takım aşınma tipi ve kesme parametreleri gibi birçok faktöre bağlı olarak değişim göstermektedir. Kesme kuvvetleri, sıcaklık, titreşim, talaş oluşum mekaniği ve/veya takımın durumu hakkında bilgi kaynağıdır [149]. Verimli bir frezeleme işlemi için kesme gücünün hesaplanması ve buna bağlı olarak da iş mili ve iş bağlama aparatının boyutlandırılması gerekir. Kesme kuvveti ölçümleri iki farklı şekilde gerçekleştirilebilmektedir. Kesme kuvveti ölçüm sistemlerinden birincisi, adaptif kuvvet ölçme olarak adlandırılan, tezgâh kontrol sistemi veya kesicinin bağlı bulunduğu motordan alınan akım veya elektrik sinyallerinin analizi ile kuvvet ölçümünün gerçekleştirilmesidir. Diğer bir kuvvet ölçme sistemi ise, iş parçası veya kesici üzerine yerleştirilen dönüştürücüler (gerinim ölçerler, yük hücreleri, dinamometreler) sayesinde kuvvet ölçümünün gerçekleştirilmesidir [150].

Bu çalışmada kesme kuvvetleri özel tasarlanmış yük hücreleri, Kistler 9257 B tipi dinamometre kullanılarak, “X”, “Y” ve “Z” eksenlerinde ölçülen kuvvet değerleri newton biriminde tespit edilmiştir. Kesme işlemi esnasında kesici ve iş parçası hareketleri ve kesme işlemi esnasında oluşan kuvvet yönleri iş parçasının bağlama konumuna göre Şekil 5.7’de görülmektedir.



Şekil 5.7. Kesici takım ve iş parçası hareketlerine bağlı olarak kesme işlemi esnasında oluşan kuvvetler ve yönleri

Şekil 5.7’de kesici takımda oluşan kesme kuvveti bileşenleri ve Şekil 5.8’de bir kesici uçta oluşan kesme kuvveti bileşenleri gösterilmiştir.



Şekil 5.8. Kesme kuvveti bileşenleri ve yönleri

$F_x = F_f$: İlerleme yönünde, “X” ekseninde ölçülen kuvvet, N

$F_z = F_r$: Takımın dönme eksenine paralel yönde, “Z” ekseninde ölçülen kuvvet, N

$F_y = F_c$: Takımın dönme yönüne zıt yönde, “Y” ekseninde ölçülen teğetsel kuvvet, N

Şekil 5.8’deki iş parçası takım arasındaki etkileşim ile oluşan kesme kuvveti bileşenleri incelendiğinde sırasıyla;

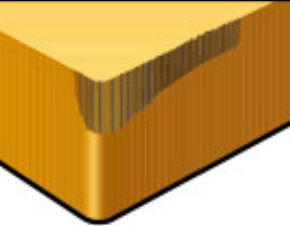
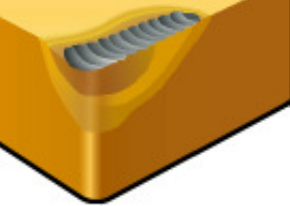
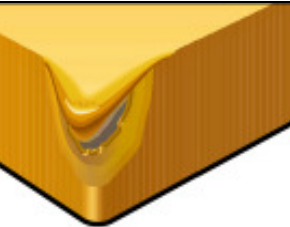
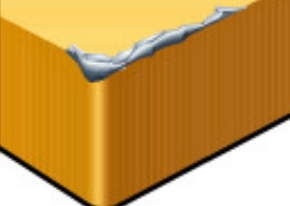

1. F_c , Teğetsel kuvvet: İşlenen malzemenin cinsi ve kesme parametrelerine bağlı olarak genelde diğer kesme kuvvetlerine kıyasla daha büyük değerde, kesicinin dönme hareketine karşı malzemenin talaşlı şekillendirmeye gösterdiği Y eksenini yönünde oluşan teğetsel tepki kuvveti.
2. F_f , ilerleme kuvveti: Kesici takım yanaşma/giriş açısı ve diğer kesme açıları ile ilişkili, takımın talaş alarak batma eğilimine karşı, takımın ilerleme hareketine zıt yönde oluşan, genelde ikinci en yüksek kuvvet bileşenidir. Diğer bir izahatla X eksenini yönünde oluşan ilerleme yönüne zıt tepki kuvveti
3. F_r , iş mili eksenini yönündeki tepki kuvveti: Takım kesme açıları (kesici takım yanaşma /giriş açısı, talaş açısı, radyal talaş açısı, kesici kenar eğim açısı, vb.) ve alt kesici kenar kesme mesafesi ile takım başlığı çapı, ilerleme hızı, kesme derinliği ile kesme hızından etkilenen işlenen malzeme tarafından takımın batmasına karşı ters yönde oluşan tepki kuvvetidir. Fener mili eksenine paralel Z eksenini boyunca oluşan kuvvettir.

5.5. Takım Aşınması

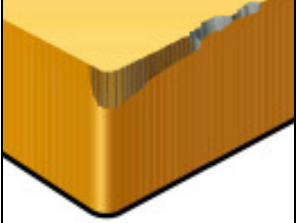
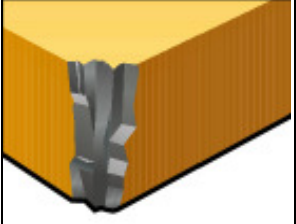
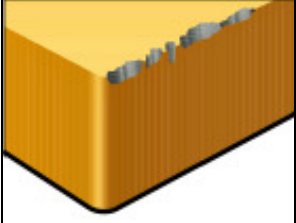
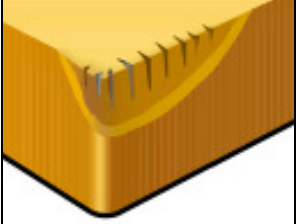
Bütün kesici takımlar talaş kaldırma işlemleri sırasında aşınır ve bu aşınma, kesici takım ömrünü tamamlayıncaya kadar devam eder. Kesici kenar ömrü dakika olarak ifade edilir. İlk zamanlarda takım ömrü parametresi sadece takımın daha fazla kesme yapmaması gibi basitçe ifade edilirdi. Günümüzde yüzey yapısı, hassasiyet, takım aşınma biçimi, güvenli takım ömrü gibi yaygın parametreler söz konusudur [134, 139]. Takım aşınması iş parçası ve kesici kenar arasındaki sürtünme ve yüksek sıcaklıklardan kaynaklanmaktadır. Talaş kaldırma sırasında meydana gelen sürtünme ve sıcaklık takımın aşınmaya karşı mukavemetini azaltan aşınmayı hızlandıran bir etkidir. Aşınmanın ana nedeni mekanik, termal, kimyasal ve aşındırıcı yüklerdir. Periyodik olarak gerçekleşen mekanik yükler neticesinde kesici takım kenarı yorulur. Frezeleme, tornalama ile karşılaştırıldığında mekanik ve termal şok çeşitli aşınmalara yol açar. Kesici kenar iş parçasına temas ettiğinde sıcaklık ani bir şekilde yükselir. İş parçasından ayrıldığında ise hızlı bir şekilde düşer. Yapışma aşınması olarak ta bilinen adhesiv aşınma esas olarak düşük sıcaklıklarda oluşur. Bu mekanizma genellikle YT oluşumuna eşlik eder. İş parçasının atmosferik şartlar altında kesici

takıma yapışması ile YT oluşumu eğilimi, sürtünme, parçadan çıkan talaş ile talaşın takım üzerinde kaydığı yüzey (talaş yüzeyi) arasında ve parçanın işlenmiş yüzeyi ile takımın bu yüzeye bakan yüzeyleri (serbest yüzey ve yanak) arasında meydana gelmektedir. Abrasiv aşınma mekanizmasına iş parçasındaki sert parçacıklar sebep olur. Difüzyon aşınmasında ise kesme işlemi esnasındaki kimyasal faktörler daha çok etkilidir. Takım malzemesinin kimyasal özellikleri ve takım malzemesinin iş parçası malzemesine olan ilgisi difüzyon aşınma mekanizmasının gelişimini belirler. Dolayısıyla aşınma; talaş yüzeyinde, yanakta ve serbest yüzeyde veya her üç yüzeyde de meydana gelebilir [151-155]. Tablo 5.1’de kesici takımda görülen aşınma tipleri, nedenleri ve muhtemel sebepleri sunulmuştur.

Çizelge 5.1. Kesici takımda görülen aşınma tipleri, nedenleri ve muhtemel sebepleri [156]

Aşınma Türü	Muhtemel Sebepler	Çözümler
 <p>Yan yüzey (yanak) aşınması</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Çok yüksek kesme hızı • Yetersiz aşınma direnci • Çok düşük ilerleme • Oksidasyon 	<ul style="list-style-type: none"> • Kesme hızı azaltılır • Aşınma direnci daha yüksek kalitede bir uç seçilir • İlerleme artırılır
 <p>Krater aşınması</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Aşırı yüksek kesme sıcaklıklarından dolayı talaş yüzeyinde oluşan difüzyon aşınması 	<ul style="list-style-type: none"> • Aşınma direnci daha yüksek uç veya Alüminyum oksit (Al_2O_3) kaplı bir uç seçilir • Pozitif uç geometrisi seçilir. • Düşük sıcaklıklar elde edilinceye kadar ilk olarak kesme hızı sonra ilerleme azaltılır.
 <p>Plastik deformasyon</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Yüksek kesme sıcaklıkları ve basınç 	<ul style="list-style-type: none"> • Aşınma direnci daha yüksek kalitede bir uç seçilmeli. • Kesme hızı azaltılır • İlerleme azaltılır
 <p>Yığılma, sıvanma</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Bazı paslanmaz çelikler, saf alüminyum gibi çok sünek malzemeler sebebiyle sıvanan iş malzemesinin kesici uca kaynaklanması • Düşük kesme hızı • Düşük ilerleme 	<ul style="list-style-type: none"> • Kesme hızı artırılır. • Çok daha uygun uç geometrisiyle değiştirilmeli • Kesme hızı artırılmalı • Pozitif uç geometri seçilir
 <p>Çentik aşınması</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Kesici uç kalitesi çok gevrek. • Çok zayıf uç geometrisi • YT oluşumu 	<ul style="list-style-type: none"> • Aşınma direnci daha yüksek bir uç seçilir • Kesme hızı azaltılır veya pozitif bir geometri seçilir • İlerleme azaltılır

Çizelge 5.1. (Devam) Kesici takımında görülen aşınma tipleri, nedenleri ve muhtemel sebepleri [156]

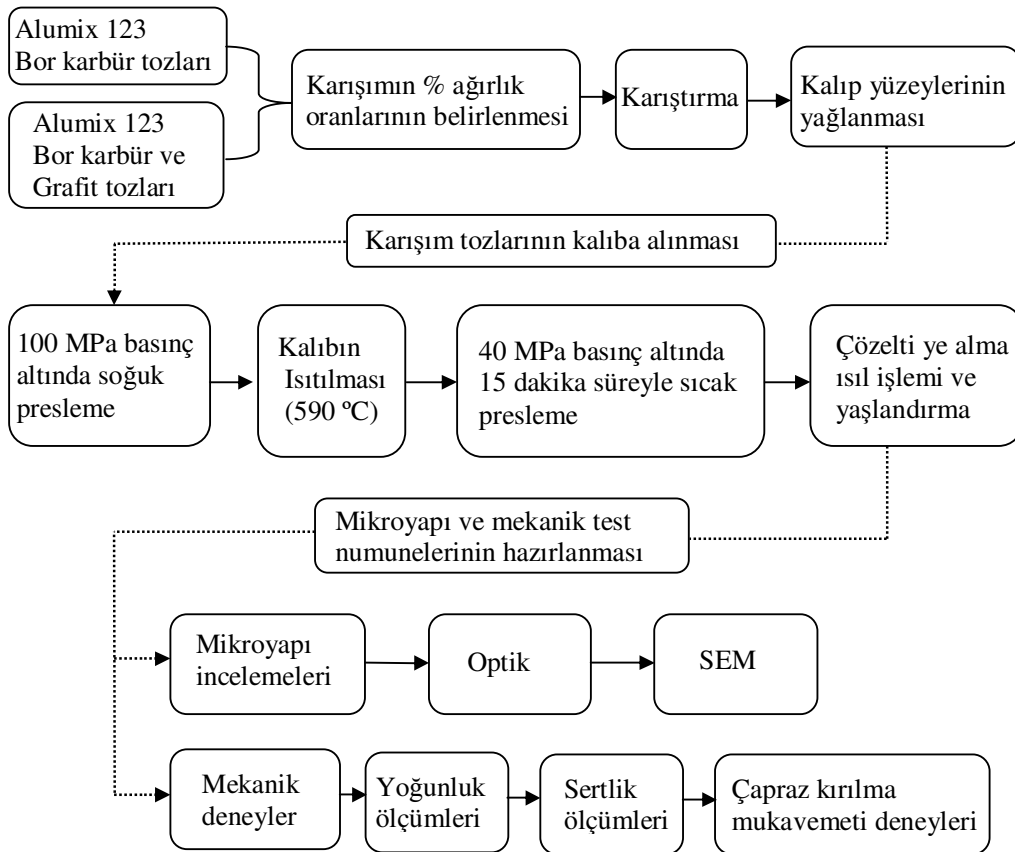
 <p>Mekanik yorulma çatlakları</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Kesici kenarda aşırı yük değişimleri • Kesme başlangıcında darbeler titreşimler. 	<ul style="list-style-type: none"> • Daha tok kalitede bir uç seçilir. • Kesme hızı azaltılır. • Takımın giriş yönü değiştirilir. • Rijitlik artırılır.
 <p>Kırılma</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Uç üzerinde aşırı yük • Çok zayıf geometri • Kesici uç çok büyük • Çok kırılğan kalitede bir uç 	<ul style="list-style-type: none"> • Daha tok kalitede bir uç seçilir • İlerleme veya kesme derinliği azaltılmalı • Daha kalın ve geniş bir uç seçilir • Rijitlik (Kararlılık) artırılır.
 <p>Kesme kenarında dökülme</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Çok kırılğan kalitede bir uç • Uç geometrisi çok zayıf • Yığılma kenar (BUE) oluşumu 	<ul style="list-style-type: none"> • Daha tok kalitede uç seçilir • Daha güçlü bir geometriye sahip uç seçilir • Kesme hızı artırılır. • Pozitif geometrili bir uç seçilir. • İş parçasına girişte ilerleme azaltılır. • Rijitlik artırılır.
 <p>Termal çatlaklar</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Değişken soğutma sıvısı temini, aralıklı kesme • Sürekli olmayan işleme şartları 	<ul style="list-style-type: none"> • Daha tok kalitede bir uç seçilir. • Bol ve sürekli soğutma sıvısı uygulanması veya hiç uygulanmaması • Kesme hızı azaltılır. • İlerleme azaltılır.

6. MATERYAL ve METOT

Bu çalışmada, alüminyum matrisli, B₄C takviyeli ve B₄C+Gr katkılı kompozitlerin sıcak presleme yöntemiyle üretimi gerçekleştirilmiştir. Kompozitlerin parçacık dağılımı, ara yüzey bağı özelliklerinin belirlenmesi amacıyla mikroyapı ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Üretilen kompozitlerin frezede işlenebilirliklerinin değerlendirilebilmesi açısından kesme kuvvetleri, takım aşınması ve yüzey pürüzlülüğü ölçümleri gerçekleştirilmiştir.

6.1. Kompozit Malzeme Üretimi

Kompozitlerin üretiminde toz metalurjisi (TM) yöntemi kullanılmış ve sıcak presleme işlemi uygulanmıştır. MMK'lerin üretiminde Şekil 6.1'de belirtilen akış şeması takip edilmiştir.



Şekil 6.1. Kompozit numunelerin üretiminde deneysel çalışmanın akış şeması

6.2. Matris ve Takviye Fazı Malzemeleri

6.2.1. Ana faz (matris) malzemesi

Metal matrisli kompozit numunelerin üretiminde, *ECKA* firması tarafından üretilen Alumix 123 kodlu alüminyum tozu matris malzemesi olarak tercih edilmiştir. Alumix 123, içerisinde %4,2~4,8 Cu ana alaşım elementi bulunan ve AlCuSiMg bileşiminden oluşan AA 2xxx serisi bir alüminyum alaşım tozudur. Resim 6.1’de alüminyum parçacıklarının SEM fotoğrafı verilmiştir.



Resim 6.1. Alumix parçacıklar

Çizelge 6.1’de *ECKA* firması tarafından gaz atomizasyonu metoduyla ön alaşımlama yapılarak, yağlayıcısız olarak özel üretilen matris malzemenin kimyasal bileşimi verilmiştir.

Çizelge 6.1. Matris malzemenin (Alumix 123) kimyasal bileşimi

Kimyasal Bileşim, %				
Cu	Mg	Si	Yağlayıcı	Al
4,5	0,5	0,6	-	Kalan

Deneylerde kullanılan Alumix 123 tozunun boyutlarını belirlemek amacıyla DIN/ISO 4497’ye göre elek analizleri yapılmış ve elde edilen sonuçlar Çizelge 6.2’de sunulmuştur.

Çizelge 6.2. Matris malzemenin (Alumix 123) elek analizi sonuçları

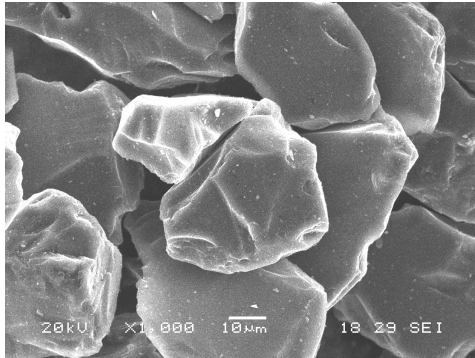
Ortalama tane boyutu, μm	> 200	< 200-100	< 100-63	< 63-45	< 45
Oran, %	2	25	38	15	20

6.2.2. Takviye fazı malzemeleri

B_4C parçacık takviyeli ve $\text{B}_4\text{C}+\text{Gr}$ katkılı MMK'lerin üretiminde bor karbür ve nikel kaplı grafit olmak üzere iki farklı tip katkı elemanı kullanılmıştır.

Bor karbür

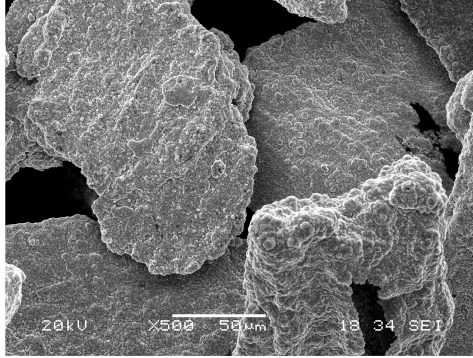
Bor karbür kimyasal maddelere karşı yüksek korozyon direnci, mükemmel yüksek sıcaklık mukavemeti, düşük yoğunluk, yüksek elastiklik modülü gibi özelliklere sahiptir. B_4C tozları, SiC veya Al_2O_3 gibi aşındırıcı tozlara kıyasla yüksek aşınma direncine sahiptir. Mükemmel mekanik özellikleri nedeniyle takviye elemanı olarak B_4C tercih edilmiştir. Deneylerde Alfa-Aeser firmasının Türkiye temsilcisi Kimeks A.Ş.'den temin edilen %99,9 saflıkta 22~39 μm ortalama parçacık boyutunda B_4C tozu kullanılmıştır. Resim 6.2'de bor karbür parçacıklarının SEM fotoğrafı verilmiştir.



Resim 6.2. Bor karbür parçacıklar

Nikel kaplı grafit

Karbon ve grafit fiberler, düşük yoğunluklu, yüksek mukavemet ve elastikiyet modüllü, ısıl kararlılıkları ve dirençleri yüksek olan takviye elemanlarıdır. Metal-metal bölgelerinde yağlayıcı özelliği ve işlenebilirliğinin daha iyi olması gibi nedenlerden ötürü B_4C+Gr katkılı kompozitlerin üretiminde grafit parçacık tercih edilmiştir. Alfa-Aeser firmasının Türkiye temsilcisi Kimeks A.Ş.'den %99,9 saflıkta üzeri akımsız kaplama yöntemiyle nikel kaplanmış, 150 μm ortalama parçacık boyutunda üzeri nikel kaplı Gr parçacıklar kullanılmıştır. Grafitin alüminyum ile güçlü bir ara yüzey bağı oluşturmasının zorluğundan dolayı ara yüzey bağının istenilen form ve özelliklerde yeterince oluşmasını sağlamak için Ni kaplı grafit tercih edilmiştir. Resim 6.3'de nikel kaplı grafit parçacıklarının fotoğrafı verilmiştir.



Resim 6.3. Nikel kaplı grafit parçacıklar

6.3. Tozların Yüzde Ağırlık Oranlarının Belirlenmesi

MMK'lerin üretiminde artan B_4C oranı, B_4C+Gr katkılı kompozitlerin üretiminde ise sabit %10 B_4C oranına bağlı olarak artan grafit miktarı esas alınmıştır. Kompozitlerin ana faz alaşımıyla kıyaslanabilmesi amacıyla Alumix 123 alaşımından takviyesiz olmak üzere aynı şartlar altında numuneler üretilmiştir. Takviye elemanları, en fazla %15 oranında matrise ilave edilmiş, üretimi gerçekleştirilen numuneler Çizelge 6.3'de listelenmiştir.

Çizelge 6.3. Üretimi gerçekleştirilen numuneler

1	% 100 Alumix
2	% 95 Alumix + % 5 B ₄ C
3	% 90 Alumix + % 10 B ₄ C
4	% 85 Alumix + % 15 B ₄ C
5	% 89 Alumix + % 10 B ₄ C + % 1 Gr
6	% 87 Alumix + % 10 B ₄ C + % 3 Gr
7	% 85 Alumix + % 10 B ₄ C + % 5 Gr

Kompozit numunelerin üretiminde, ilk olarak Çizelge 6.3’de belirtilen yüzde oranlarına bağlı olarak karışım miktarları hesaplanmıştır. Takviye elemanlarının özgül ağırlıklarının farklı olması nedeniyle takviye miktarları yüzde ağırlık oranlarına göre Eş. 6.1 ile tespit edilmiştir. Buna göre;

$$\rho = W/V \text{ eşitliği düzenlendiğinde} \quad (6.1)$$

$$W = \rho \cdot V \text{ formülü ile toz ağırlıkları hesaplanmıştır.} \quad (6.2)$$

Burada;

ρ : Yoğunluk (g/cm³),

V : Üretilecek parça hacmi (cm³),

W: Toz ağırlığı (g)

Üretilecek parça boyutları;

En = 60 mm, Boy = 60 mm, Yükseklik = 12 mm olmak üzere parça hacmi;

$$V = 60 \times 60 \times 12 = 43200 \text{ mm}^3$$

Üretici firma tarafından verilen bilgilere göre takviye elemanlarının yoğunlukları sırasıyla; Alumix 123 için 2,815 g/cm³, B₄C için 2,52 g/cm³, Gr ise 2,25 g/cm³ alınmıştır. MMK numunelerin yoğunlukları “Eş. 6.3” denklemi ile hesaplanmıştır.

$$\rho_{\text{kar}} = [(\%W_1) \cdot \rho_1] + [(\%W_2) \cdot \rho_2] + \dots + [(\%W_n) \cdot \rho_n] \quad (6.3)$$

Burada;

$\rho_{\text{karışım}}$: Toz karışımın teorik yoğunluğu,

$(\%W)_n$: Her bir bileşenin karışım içerisindeki ağırlığı ,

ρ_n : Her bir bileşenin yoğunluğudur.

Kalıba konulacak toz miktarı;

$$W_{\text{karışım}} = \rho_{\text{karışım}} \cdot V \quad (6.4)$$

Üretilcek her bir numune için parçanın boyutlarına ve karışımın yoğunluğuna bağlı olarak Eş. 6.4 denklemi yardımıyla hesaplanan toz miktarları Çizelge 6.4’de verilmiştir.

Çizelge 6.4. Takviye elemanlarının oranları ve ağırlıkları

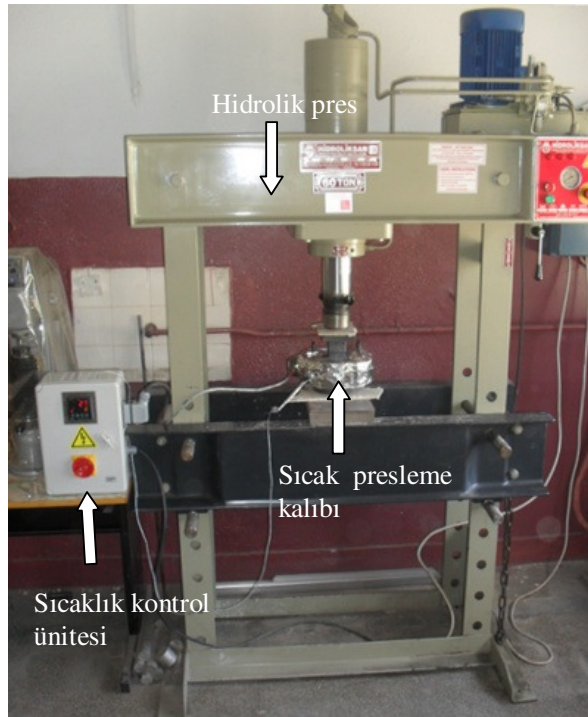
<i>Numune kodları</i>	<i>Kompozit numune</i>	<i>% Al (g)</i>	<i>% B₄C (g)</i>	<i>% Gr (g)</i>
Alumix 123	% 100 Alumix 123	121,68	-	-
5 B ₄ C	% 5 B ₄ C	114,85	6,04	-
10 B ₄ C	% 10 B ₄ C	108,18	12,02	-
15 B ₄ C	% 15 B ₄ C	101,58	17,92	-
10 B ₄ C + 1 Gr	% 10 B ₄ C + % 1 Gr	106,71	11,99	1,19
10 B ₄ C + 3 Gr	% 10 B ₄ C + % 3 Gr	103,80	11,93	3,57
10 B ₄ C + 5 Gr	% 10 B ₄ C + % 5 Gr	100,91	11,87	5,93

6.4. Tozların Karıştırılması

Toz karışımlarının hazırlanmasında 0,1 mg hassasiyetli “Sartorius BL 210S” marka dijital terazi kullanılmıştır. Karıştırma işleminde, Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği laboratuvarlarındaki “Turbula-Model T2F” marka karıştırıcı cihaz kullanılmıştır. Tozların homojen karışımını sağlamak amacıyla 150 g karışım tozu tank içerisine konularak 30 dakika süreyle karıştırılmıştır.

6.5. Tozların Sıkıştırılması ve Sinterlenmesi

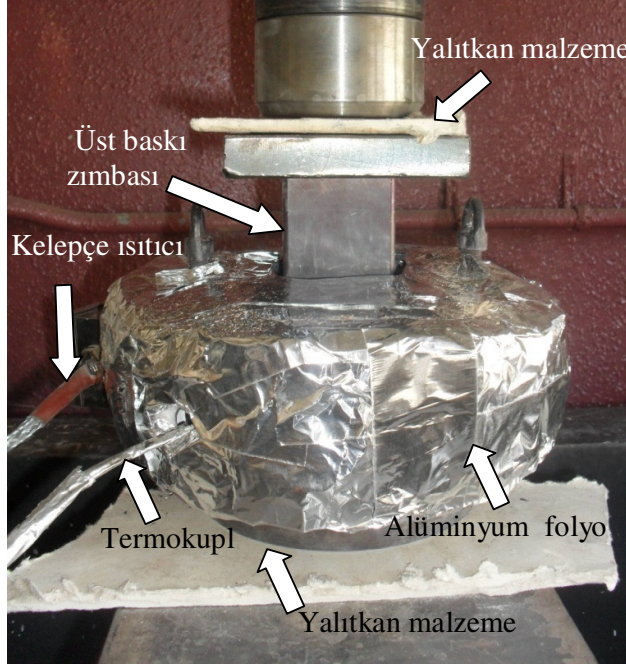
Sıcak presleme (SP) yöntemiyle MMK'lerin üretimi Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İmalat Mühendisliği Bölümünde mevcut olan Kompozit Geliştirme Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Laboratuvarında MMK'lerin üretiminde kullanılan 60 ton kapasiteli hidrolik pres ve G.Ü. Bilimsel Araştırma Projeleri 07/2010-37 kodlu proje kapsamında imal edilen sıcak presleme kalıbı ve sıcaklık kontrol ünitesi Resim 6.4'te görülmektedir.



Resim 6.4. Sıcak presleme işleminde kullanılan makine ve cihazlar

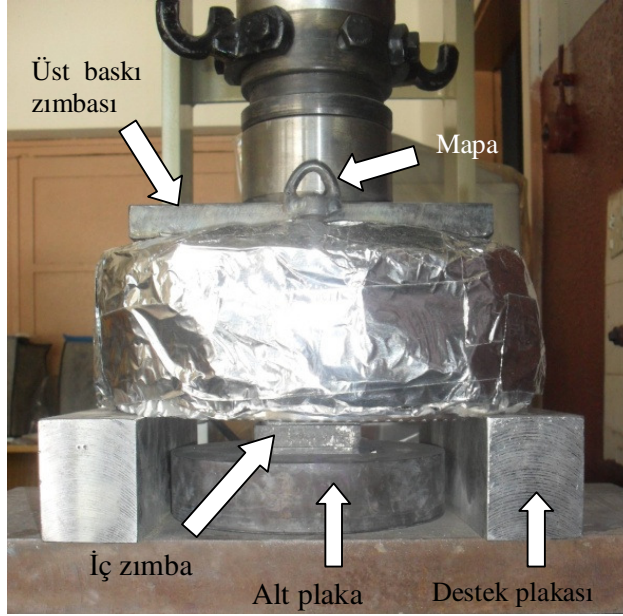
Kompozitlerin üretiminde SP yönteminin tercih edilme sebebi, presleme ve sinterleme işleminin tek adımda gerçekleştirilmesinden dolayı yüksek yoğunluklu parçaların üretimine imkan sağlamasıdır. Kalıbın istenilen sıcaklığa ulaşması etrafına sarılan kelepçe ısıtıcı yardımıyla sağlanmıştır. Sistemin ısı yalıtımının sağlanması amacıyla üzeri seramik battaniye ile sarılmış ve alüminyum folyo ile (Resim 6.5) kapatılmıştır. Ayrıca kalıbın alttan pres tablası üstten ise piston tarafından ısı transferinin kesilmesi ve ısının etkisi ile pistonun zarar görmemesi için yalıtkan

malzeme ile sistemin alt ve üst zemin ile bağlantıları kesilmiştir. Karışım tozlarının kalıp duvarlarına ve iç zimba yüzeylerine yapışmasının engellenmesi amacıyla, tozlarının kalıp içerisine alınmasından önce kalıp iç duvarları ve iç zimbaların yüzeyleri “Molykote P-1900” kodlu katı yağlayıcı ile yağlanmıştır.



Resim 6.5. Sıcak presleme kalıbı

Kalıbın istenilen sıcaklığa (590 °C) kontrollü bir şekilde ulaşmasında sıcaklık kontrol ünitesi kullanılmıştır. Sistem sıcaklığının kontrollü 1200 °C sıcaklığa dayanıklı K tipi bir termokupol vasıtasıyla sağlanmıştır. Sıcak presleme yöntemiyle MMK'lerin üretiminde karışım tozlarının ön şekillendirilmesi için 100 MPa basınç altında soğuk olarak preslenmiştir. Daha sonra sistem ısıtılarak 590 °C'de 40 MPa basınç altında 15 dakika süreyle sıcak olarak preslenmiştir. SP işlemi sonrasında şekillendirilen blok numunenin deformasyonundan kaçınmak için kalıbın oda sıcaklığına kadar soğuması beklenmiştir. Daha sonra gövde üzerindeki mapalar yardımıyla kalıp yukarı kaldırılarak destek plakaları üzerine alınmıştır. Üst baskı zımbası üzerine uygulanan baskı kuvveti yardımıyla (Resim 6.6) sırasıyla alt gövde daha sonra iç zimba ve devamında numune çıkartılmıştır.



Resim 6.6. Numunelerin kalıptan çıkartılması

6.6. Çökeltme Isıl İşlemi

Çökeltme sertleşmesi birbirleri içerisinde sınırlı çözünürlüğe sahip alaşımlara uygulanan bir sertleştirme yöntemidir. Bu işlem, ikinci fazın bir matris içinde katı çözültiden çökmesi sonucu alaşımın mukavemetinin artmasını sağlar. MMK numunelere ilk olarak dikey fırında 530 °C sıcaklıkta 3 saat süreyle çözültiyeye alma ısıl işlemi uygulanmıştır. Daha sonra numuneler düşey fırın altında bulunan su banyosuna düşürülerek hızlı bir şekilde soğutulmuştur. Son olarak tav fırınında 160 °C'de 12 saat süre ile fırında bekletilerek suni yaşlandırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Devamında fırından çıkarılan numuneler hava ortamında soğumaya bırakılmıştır.

6.7. Yoğunluk Ölçüm Cihazı

Yüzde ağırlık oranlarına göre üretilen MMK malzemelerin tam yoğunluklarının belirlenmesinde Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümünde bulunan 0,0001 gr hassasiyete sahip "Sartorius" marka terazi ve yoğunluk ölçüm kiti kullanılmıştır. Yoğunluk kiti ile katı malzemenin

yoğunluğunun belirlenmesinde kullanılan matematiksel Eşitlik 6.5’de sunulmuş ve işlem basamakları maddeler halinde verilmiştir.

$$\varphi = W \div G \times \text{Rho (g/cm}^3\text{)} \quad (6.5)$$

Yoğunluk kitiyle yoğunlukların belirlenmesi;

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

6.8. Metalografik İnceleme İçin Ön Hazırlık

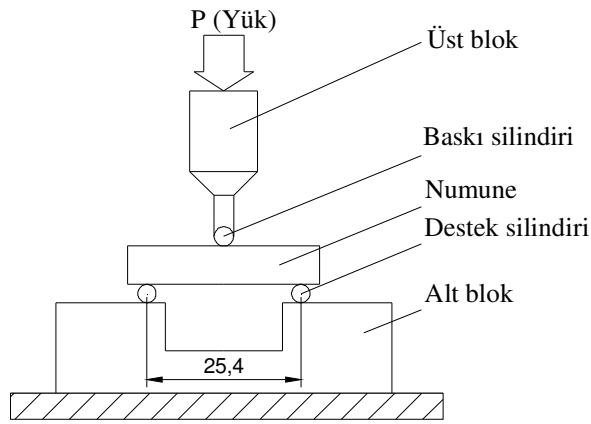
MMK malzemelerin üretiminden sonra mikroyapı incelemeleri için gerekli ön hazırlık işlemlerinin rahatlıkla yapılabileceği elle tutulabilir numuneler hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler sıcak presleme yöntemiyle bakalit içerisine gömülmüş ve yüzeylerinin parlatılması Struers™ Tegrapol-15 marka otomatik parlatma cihazı yardımıyla gerçekleştirilmiştir.

6.9. Sertlik Ölçümü

Üretimi gerçekleştirilen MMK’lerin çökeltme ısıl işlemi öncesi ve sonrası sertlik değerleri INSTRON WOLPERT GmbH DIATESTOR 7551 marka sertlik ölçme cihazıyla ölçülmüştür. Brinell makro sertlik ölçümleri 2,5 mm çapında bilya ve 31,25 kg yük uygulanarak gerçekleştirilmiştir. Her numunenin 5 farklı noktasından alınan ölçümlerin ortalama değeri kabul edilmiştir.

6.10. Çapraz Kırılma Mukavemeti Ölçümü

MMK numunelerin mekanik özellikleri üzerine yapılan çalışmanın son aşaması *çapraz kırılma mukavemeti* deneyidir. Deneyler SEHIMADSU AG-50kNG marka servo-hydraulic eğme testi cihazında gerçekleştirilmiştir. Hazırlanan numuneler Şekil 6.2’de şematik resmi görülen standart çapraz kırılma deney aparatında kırılma deneyine tabi tutulmuştur.



Şekil 6.2. Çapraz kırılma deney aparatının şematik gösterimi

Kırılma işlemi 2,5 kN/sn hızıyla gerçekleştirilmiş, presten elde edilen yük değerine (P) göre numunelerin kırılma dayanımları (ASTM B528-05) standardında belirtilen Eş. 6.6 yardımıyla hesaplanmıştır.

$$TRS = \frac{3.P.L}{2.t^2.w} \quad (6.6)$$

Burada;

P: Kırılma anında numuneye uygulanan yük (N)

L: Destekler arası uzaklık (25,4±3 mm)

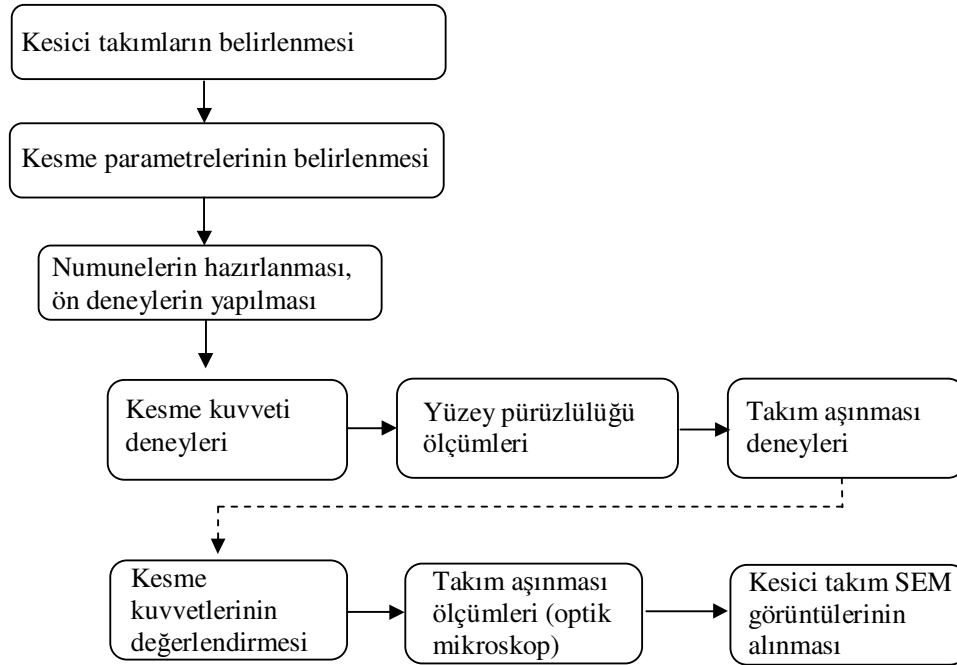
t: Numunenin kalınlığı (6,35 mm)

w: Numunenin genişliği (12,70 mm)

TRS: Eğilme dayanımı (MPa)

6.11. İşlenebilirlik Deneyleri

Sıcak presleme yöntemiyle üretilen kompozitlerin talaşlı imalatla şekillendirilebilme özelliklerinin belirlenmesi amacıyla işlenebilirlik deneyleri gerçekleştirilmiştir. Üretilen kompozitlerin işlenebilirlik deneyleri; kesme kuvvetleri, yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınması yönünden incelenmiştir. Kesme hızı, takviye elemanı tipi, yüzde oranı ve kesici takım dikkate alınarak değerlendirmeler yapılmıştır. İşlenebilirlik deneylerinde Şekil 6.3’de görülen akış şeması takip edilmiştir.



Şekil 6.3. İşlenebilirlik deneylerinin akış şeması

6.11.1. Takım tezgahı, takım tutucular, kesici takımlar ve kesme parametreleri

Takım Tezgahı

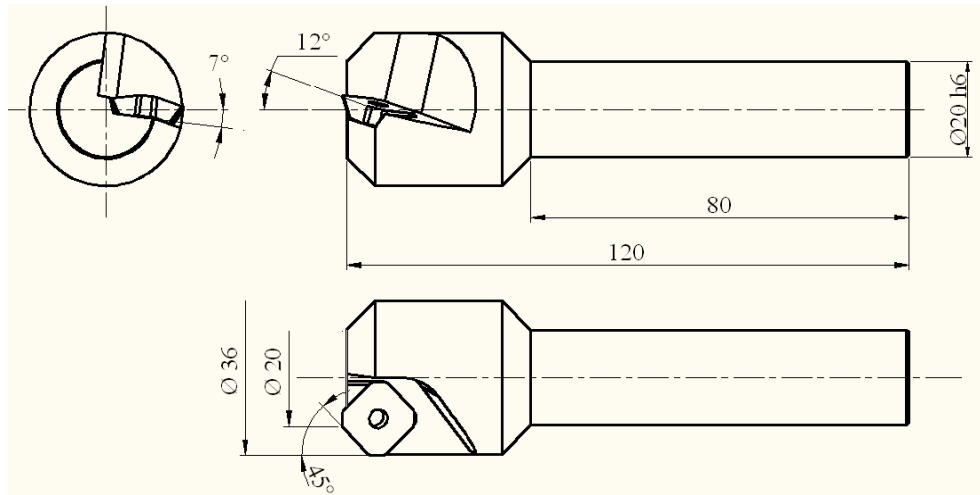
İşlenebilirlik deneyleri Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İmalat Mühendisliği Bölümünde bulunan Johnford VMC 850 CNC dik işleme merkezinde gerçekleştirilmiştir. Tezgaha ait teknik özellikler Çizelge 6.5’de verilmiştir.

Çizelge 6.5. Johnford VMC 850 CNC dik işleme merkezinin teknik özellikleri

Tabla	1000 x 500 mm
Boyuna Hareket (X)	1050 mm
Enine Hareket (Y)	500 mm
Düşey Hareket (Z)	610 mm
Fener Mili Koniği	BT-40
Fener Mili Hızı	60-8000 rev/min
Fener Mili Motor Gücü	5,5 kW
X-Y-Z Hızlı Hareket	30/30/20 m/min
İlerleme	1-1200 mm/min
Takım Sayısı	ATC 24
En Büyük Takım Çapı	100 mm
En Büyük Takım Uzunluğu	300 mm
En Büyük Takım Ağırlığı	10 kg

Takım Tutucu

İşlenebilirlik deneylerinde, kullanılan takım tutucular ISO 8688-I'de belirtilen standartlara ve deneylerin yapılacağı BSD tezgahının takım bağlama başlığına uygun olarak seçilmiştir. Tek takım bağlama özelliğine sahip, Sandvik Coromant firmasına işleme çapı 20 mm olarak özel ürettirilen kesici takıma ait özellikler Şekil 6.4'te sunulmuştur.









Şekil 6.4. İşlenebilirlik deneylerinde kullanılan takım tutucunun özellikleri

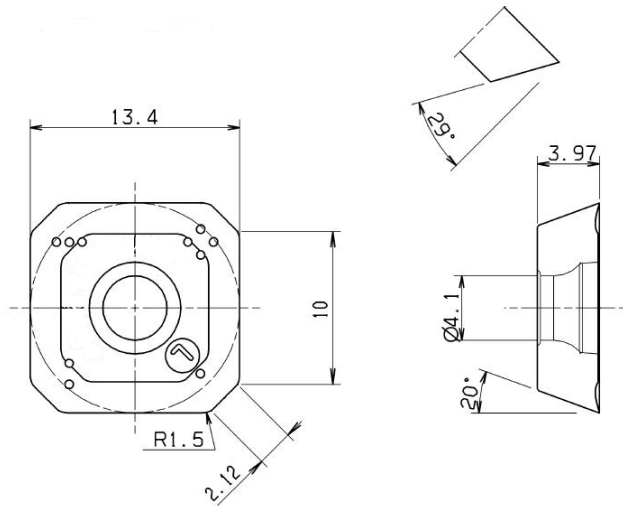
Kesici Uçlar

İşlenebilirlik deneylerinde Sandvik Coromant firmasından temin edilen aynı geometriye sahip üç farklı kesici uç kullanılmıştır. Dört kesme kenarı kullanılabilen kaplamalı ve kaplamasız SK ve iki kesme kenarı kullanılabilen kübik bor nitrür olmak üzere üç farklı özellikte kesici uca ait teknik özellikler Çizelge 6.6'da verilmiştir.

Çizelge 6.6. Kesici uçlara ait teknik özellikler

Uç no	Üretici kodu	Kaplama	Ana yapı	Uç geometrisi	Kesici uç
SK1	R 245-12 TE 3 E-KL H13 A	Kaplamasız	WC	0° 	
SK2	R 245-12 TE 3 E-KL 1020	PVD Ti(C,N)+TiN	WC	0° 	
KBN	R 245-12 TE CB50	Kaplamasız	KBN		

Tüm kesiciler için aynı uç geometrisi tercih edilmiş ve kesici ucun geometrisi Şekil 6.5'de sunulmuştur.



Şekil 6.5. Kesici ucun geometrisi

İşleme Parametreleri

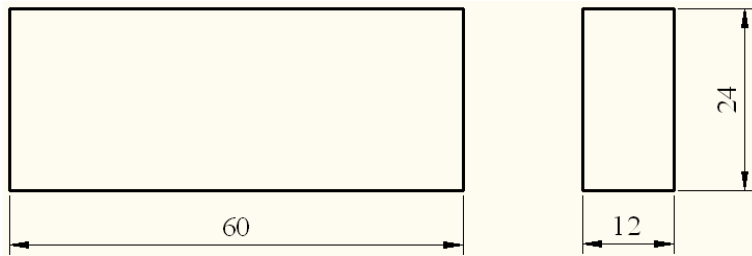
Kesme parametreleri üretici firmanın önerileri ve literatür çalışmalarına bağlı olarak, yapılan ön deneyler sonrasında belirlenmiştir. Kesme derinliği ve ilerleme sabit tutularak takım uç geometrisine bağlı olarak seçilmiştir. Tüm deneyler kuru kesme şartları altında gerçekleştirilmiştir. Seçilen kesme parametreleri Çizelge 6.7’de verilmiştir.

Çizelge 6.7. Deneylerde kullanılan işleme parametreleri

<i>Kesici uç tipi</i>	<i>Kesme hızları (V), m/min</i>	<i>İlerleme (f), mm/rev</i>	<i>Kesme derinliği (a), mm</i>
Sementit karbür	50-65-85-110	0,11	0,5
Kübik bor nitür			

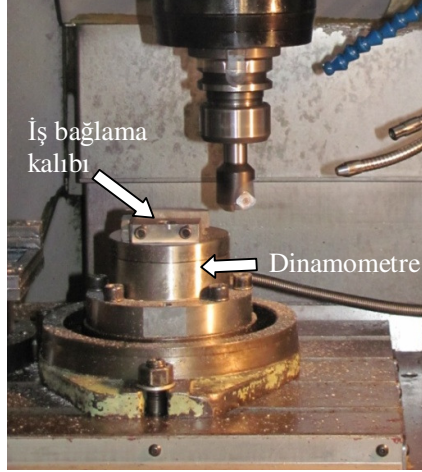
6.11.2. Numunelerin bağlanması

Kesme kuvvetlerinin sağlıklı bir şekilde alınabilmesi için Kistler 9527 B model dinamometresinin bağlama ölçülerine uygun olarak üretilen MMK numuneler tel erozyon tezgahında 24 x 60 x 12 mm ölçülerinde (Şekil 6.6) hazırlanmıştır.



Şekil 6.6. İşlenebilirlik deney numunelerinin boyutları

MMK numunelerin dinamometreye bağlanmasında kolaylık ve işlenmesine imkan sağlayacak şekilde Resim 6.7’de görülen bağlama aparatı tasarlanmış ve imalatı yapılmıştır.

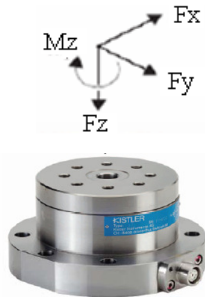


Resim 6.7. MMK numunelerin bağlama aparatına bağlanması

6.11.3. Kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğünün ölçülmesi

Kesme kuvveti ölçüm cihazı

Kesme kuvvetlerinin ölçümünde Johnford VMC 850 CNC dik işleme merkezi tablasına bağlanan KISTLER 9272A dairesel dinamometre kullanılmıştır. Sistemde; KISTLER 9272A 4 bileşenli dinamometre, dinamometreden gelen sinyallerin veri okuma kartına (KISTLER PCIM DAS 1602/16) aktarılmasında çok kanallı bir amplifier ve son olarak da verilerin işlenmesi ve grafiklerin elde edilmesi için Windows işletim sistemi ile uyumlu KISTLER Dynoware 2825A-02-01 yazılımı kullanılmıştır. Resim 6.8’de dinamometre ve kuvvet yönleri gösterilmiştir.



Resim 6.8. Dinamometre ve kuvvet yönleri

Yüzey pürüzlülüğü ölçümü

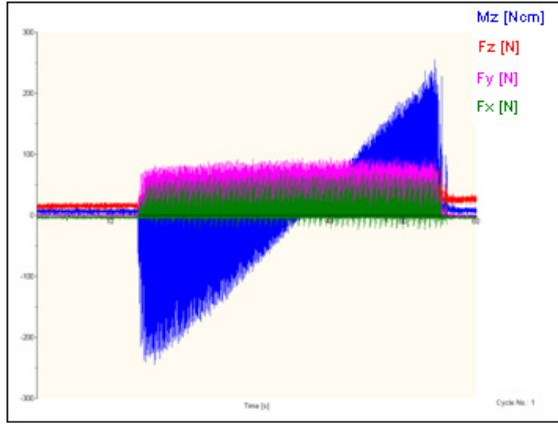
Yüzey pürüzlülüğü ölçümleri, portatif bir yüzey pürüzlülük cihazı olan *Mahr Perthometer M1* cihazı yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Cihaza ait teknik özellikler Çizelge 6.8’de sunulmuştur. Ölçüm işlemlerinde ISO 4288’e uygun olarak, örnekleme uzunluğu ve ölçme uzunluğunun (L) tespitinde ilgili kurallar dikkate alınmıştır [157]. Yüzey pürüzlülüğü ölçümlerinde, işlenmiş iş parçası yüzeyinde ilerleme yönünde üç farklı bölgeden alınan ortalama yüzey pürüzlülüğü değerleri (Ra) esas alınmıştır. Yüzeğe ait ortalama pürüzlülük değerleri, ölçülen üç değer aritmetik ortalaması alınarak tespit edilmiştir.

Çizelge 6.8. Yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazının teknik özellikleri

<i>Model</i>	<i>M1</i>
<i>Tarama hızı</i>	<i>0,5 m/s</i>
<i>Tarama kuvveti</i>	<i>0,75 mN</i>
<i>İğne uç yarı çapı</i>	<i>2 μm</i>
<i>Ölçüm aralıkları</i>	<i>100-150 μm</i>
<i>Profil çözünürlüğü</i>	<i>12 mm</i>
<i>Filtre</i>	<i>Guassian</i>
<i>Örnekleme uzunluğu (λ)</i>	<i>0,25-0,8-2,5 (mm)</i>
<i>Ölçme uzunluğu (L)</i>	<i>1,75-5,6-17,5 (mm)</i>
<i>Ölçülebilen parametreler</i>	<i>R_a, R_z, R_{max}</i>
<i>Dil</i>	<i>Seçilebilir 10 Avrupa, 3Asya dili</i>
<i>Güç kaynağı</i>	<i>Entegre, NiCd şarj edilebilir pil</i>
<i>Boyutlar</i>	<i>190x170x75 mm</i>

6.11.4. Kesme kuvveti bileşenlerinin ölçülmesi

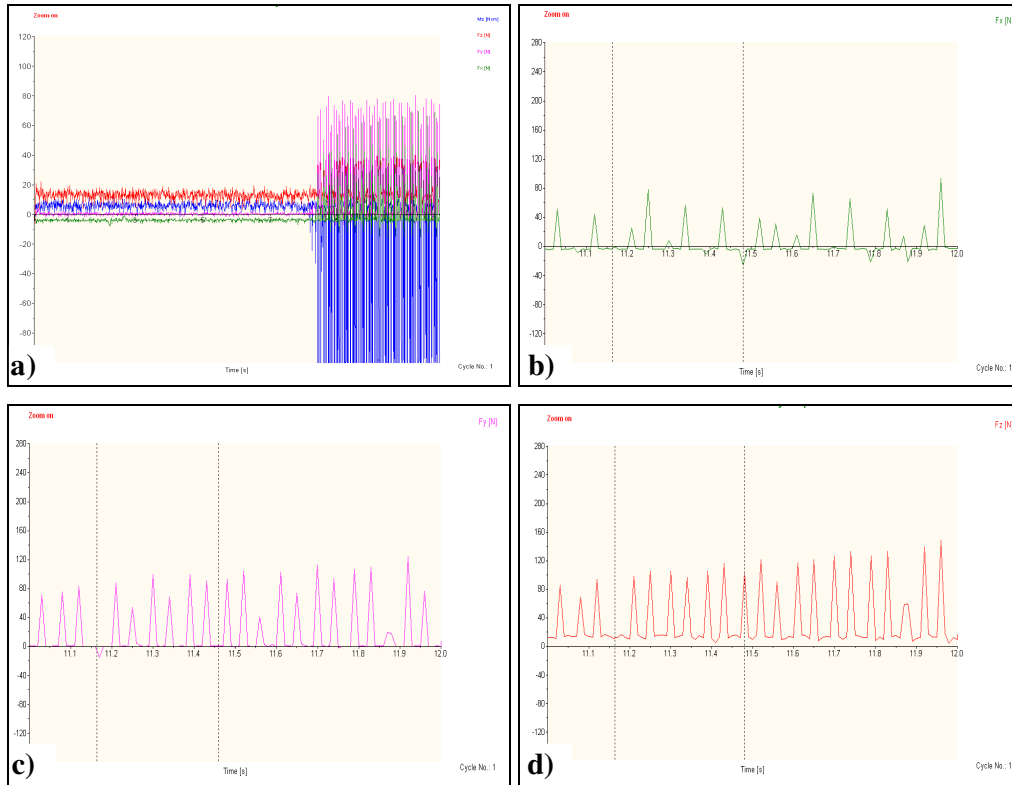
Kompozitlerin frezelenmesi esnasında dinamometre yardımıyla elde edilen kuvvet ve moment değerleri Kistler DynoWare 2825D-02 kodlu yazılım ile kayıt altına alınmıştır (Şekil 6.7).



Şekil 6.7. DynoWare programı ile elde edilen kesme kuvvetleri ve moment grafiği

Kesme kuvveti yönlerine bağlı olarak Şekil 6.7 incelendiğinde, kuvvet bileşenlerinden “Fy” ve “Fz” nin pozitif yönde kuvvet etkileri gözlenirken, “Fx” nin ise bir kısmı pozitif bölgede oluşmakla birlikte çoğunlukla negatif bölgede kuvvet etkilerinin var olduğu gözlenmiştir. Bu negatif yöndeki kuvvet oluşumu, dinamometrenin “X” eksenine zıt yönde tepki kuvvetlerinin oluştuğunu göstermektedir. Grafikten kuvvet bileşenlerinin takımın iş parçasını ilk kesme işleminde dengesiz vuruntulu bir kesme girişiyle kararsızlık sergilediği ve bir süre sonra kesme işleminin kararlı bir yapıya geçerek kuvvetlerin düzenli seyrettiği görülmektedir. Kesme işleminin sonunda da kuvvetlerin kademeli olarak kesilen talaş hattının azalmasıyla azaldığı ve sonunda en az düzeye indiği anlaşılmaktadır. Kesme işleminde oluşan kuvvet bileşenleri, kesici uç üzerine aynı yönde etki etmektedir. Kuvvet bileşenlerinin ölçümünde yük hücreleri kesici uç altına yerleştirildiği takdirde bu kuvvetler gerçek değerlerinde anlık tespit edilebilir. Fakat frezeleme işlemlerinde dinamometre gibi iş parçası altına yerleştirilen yerel kuvvet eksen yönleri sürekli sabit kuvvet ölçüm sistemleri bu durumu zorlaştırmaktadır. Sabit kuvvet ölçüm yönlerine göre, kesme işlemi süresince kesicinin kesme yayı üzerindeki dönme hareketine bağlı olarak kuvvet bileşenlerinin etkileri sürekli değişim göstermektedir. Bundan dolayı frezeleme işleminde kesme kuvvetlerinin değerlendirilmesinde zamanın tümünü ele almak yanlış değerlendirmelere sebep olacaktır. Bu metotla kesme kuvveti bileşenleri, ancak dinamometre eksen yönleriyle, kesici uç yüzeyinde oluşan kuvvet tepkilerinin paralel olduğu konumda

birim zamanda alınan yoldan 5 mm yol için gereken süre 2 saniye bulunur. Şekil 6.9. a'da kuvvetler incelendiğinde DynoWare programında ilk 9 saniye takımın yaklaşması, dışarıdan giriş mesafesi için geçen süre olduğu, 9 saniye sonrasında takımın kesme işlemine başladığı görülmektedir. Fakat kararlı bir kesmenin oluşması ve sağlıklı ölçümlerin alınabilmesi için yukarıda hesaplanan (2 s) süre takımın kesme işlemine başladığı zamana (9 s) eklenerek 11 saniye sonrasındaki kuvvetlerin değerlendirilmesi yapılmıştır. Kesme kuvvetlerinin değerlendirilmesinde, kararlı kesme işlemi süresinde gerçekleşen birbirini senkronize takip eden ritmik dalgalanmalar alınmıştır.



Şekil 6.9. DynoWare programında kesme kuvvetlerinin belirlenmesi, 11 ve 11,4 s içerisinde, kesme kuvvetlerine ait değişim grafikleri a) 10,2 s sonrasında oluşan kuvvetler, b) F_x (F_f), c) F_y (F_c), d) F_z (F_r) kesme kuvveti

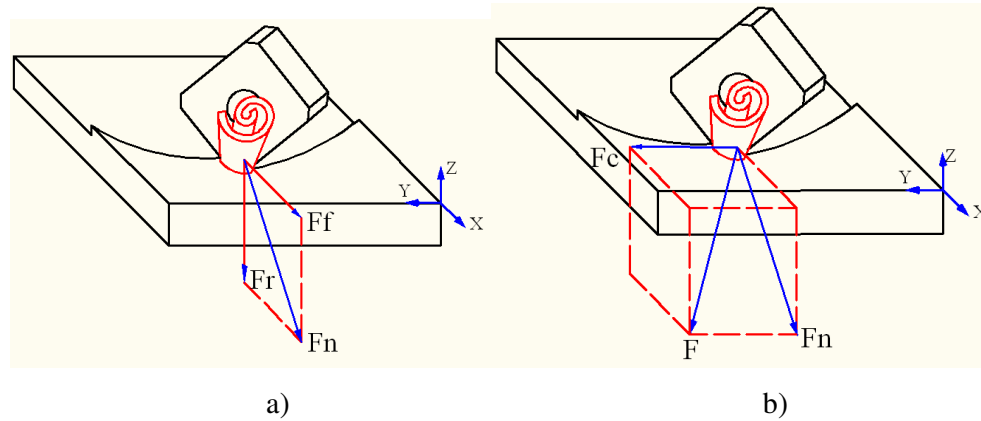
İlerleme yönüne zıt yönde oluşan F_x kuvveti Şekil 6.9.b'de, talaşın şekillenmeye karşı gösterdiği F_y yönünde oluşan esas kesme kuvveti Şekil 6.9.c'de, iş mili yönüne zıt yönde oluşan F_z kuvveti ise Şekil 6.9.d'de, görülmektedir. Grafiklerden X, Y, Z

eksenlerinde ölçülen kuvvet bileşenlerinin en yüksek değerlerinin ortalamaları alınmıştır. Şekil 6.9'da örnek deney şartlarında oluşan kesme kuvvetleri Çizelge 6.9'da verilmiştir. Bileşke kesme kuvveti analitik ve çizim metodu olmak üzere iki farklı yöntemle hesaplanabilir.

Çizelge 6.9. Kesme kuvveti bileşenleri

Kesme hızı, (V_c) <i>m/min</i>	Devir, (n) <i>rev/min</i>	İlerleme (f), <i>mm/min</i>	$F_f (F_x)$ <i>N</i>	$F_c (F_y)$ <i>N</i>	$F_r (F_z)$ <i>N</i>
85	1354	148	77,36	99,18	115,97

Alın frezelemede oluşan kesme kuvvetleri Şekil 6.11'de görülmektedir. Bu kuvvetler dinamometre ile tespit edilmektedir.



Şekil 6.10. Kesici takım ucunda oluşan kesme kuvveti bileşenleri
a) Normal kuvvet ve bileşenleri, b) Bileşke kesme kuvveti ve bileşenleri

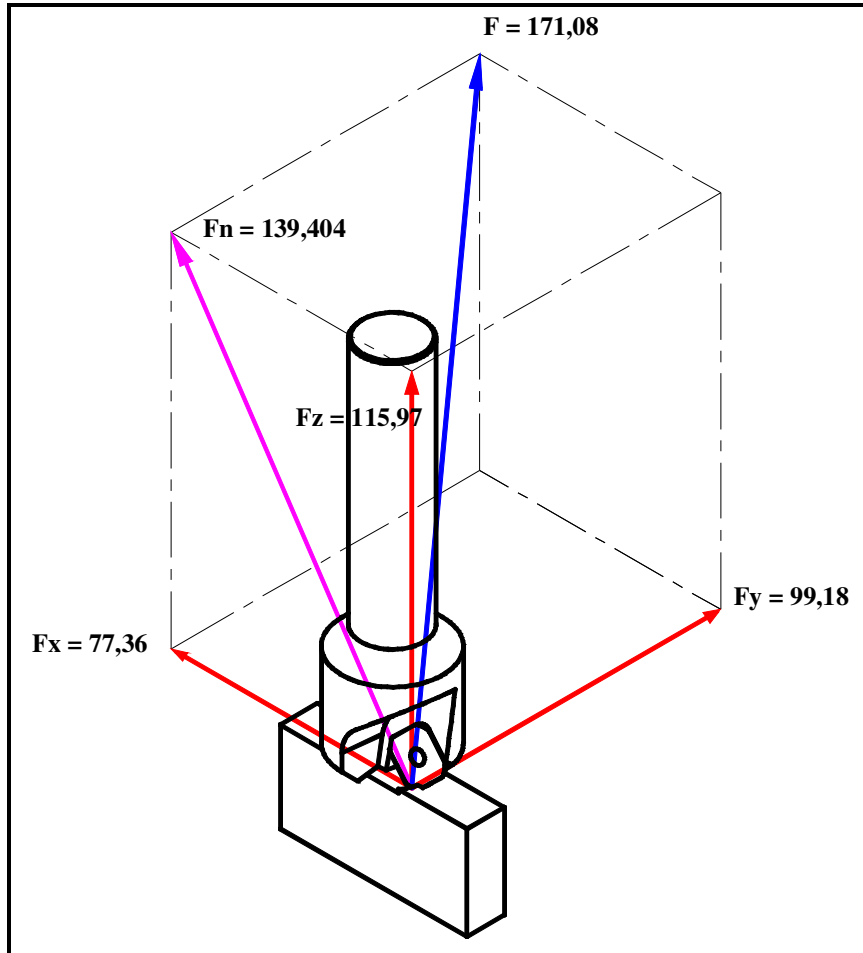
Şekil 6.10.a'da normal kuvvetin bileşenleri F_f ve F_r kuvveti görülmektedir. Şekil 6.10.b'de ise kesici uca dik olarak alınan ortalama bileşke kesme kuvvetinin (F) bileşenleri, teğetsel kuvvet (F_c) ve normal kuvvet (F_n) görülmektedir. Analitik yöntemle bileşke kuvvetin belirlenmesinde ilk olarak F_n kuvvetinin hesaplanması gerekir. F_n kuvveti Eş. 6.7 kullanılarak hesaplanır.

$$F_n = \sqrt{(F_r)^2 + (F_f)^2} \quad (6.7)$$

Ortalama talaş kaldırma kuvveti (bileşke kuvvet) Eş. 6.8 kullanılarak hesaplanır.

$$F = \sqrt{(F_c)^2 + (F_n)^2} \quad (6.8)$$

Çizelge 6.19'daki kesme kuvveti sonuçlarına göre Eş. 6.7-6.8 kullanılarak bileşke kesme kuvveti $F=171,08$ N olarak hesaplanır. Şekil 6.11'de kesme işlemi esnasında, en büyük talaş kesitinin kaldırıldığı, takım ucunun simetri eksenine ile aynı doğrultudaki konumda oluşan kuvvet bileşenleri ve yönleri kullanılarak bileşke kesme kuvvetinin çizim metoduyla tespit edilme şekli verilmiştir.

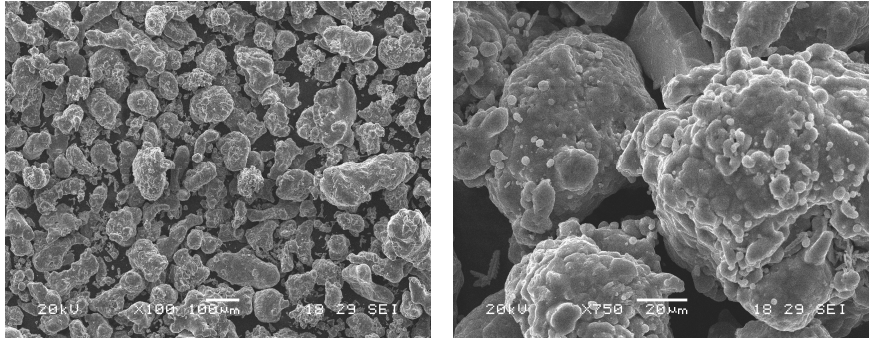


Şekil 6.11. Bileşke kesme kuvvetinin çizim metoduyla tespit edilmesi

7. DENEYSEL BULGULAR ve TARTIŞMA

7.1. Malzeme Özellikleri

Kompozit malzemelerin mekanik özellikleri üzerinde en etkili parametre matris ve takviye elemanın cinsi, boyutu, biçimi ve matris/partikül ara yüzey bağıdır. Deneylerde kullanılan matris ve takviye elemanlarının farklı büyütme ölçeklerindeki SEM resimleri Resim 7.1-7.3'te sunulmuştur. Resim 7.1'de farklı büyütme ölçeklerinde çekilen Alumix 123 tozunun SEM fotoğrafları görülmektedir.



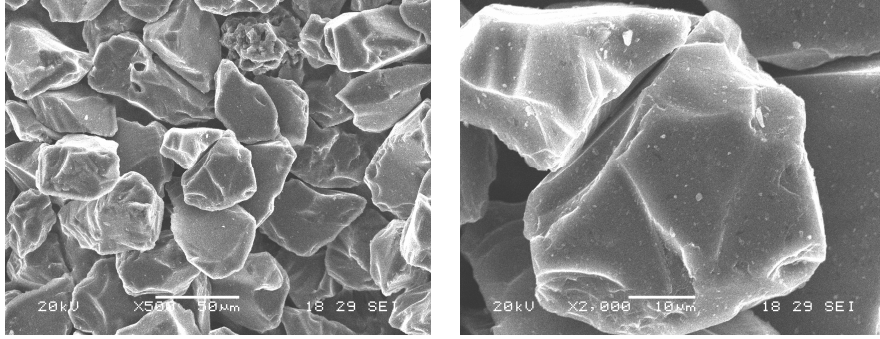
a)

b)

Resim 7.1. Alumix 123 tozunun SEM görüntüleri

a) x100 büyütme, b) x750 büyütme

Resim 7.1'de Alumix 123 tozunun en-boy oranlarının değişken ve daha çok yuvarlak şekilli olduğu tespit edilmiştir. Alumix 123 tozlarının SEM fotoğraflarında yapılan incelemeler parçacıkların hepsinin de aynı form ve boyutta olmadıklarını göstermiştir. Bu nedenle parçacık boyutlarının net bir değerle sınırlandırılmayacağı bunun yerine ortalama bir tane boyutu ile ifade edilebilecekleri belirlenmiştir. Parçacık elek boyutlarına bağlı elde edilen analiz sonuçları Ek-1'de sunulmuştur. Resim 7.2'de farklı büyütme ölçeklerinde çekilen B₄C tozlarının SEM fotoğrafları görülmektedir.

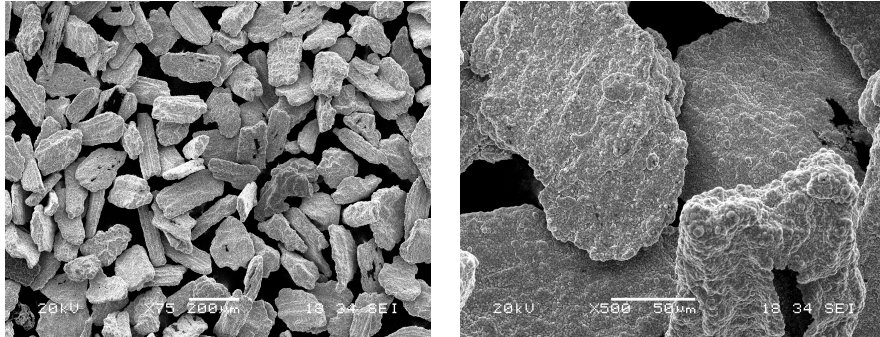


a)

b)

Resim 7.2. B₄C parçacıklarının SEM görüntüleri
a) x50 büyütme, b) x2000 büyütme

Şekil 7.2 incelendiğinde B₄C parçacıklarının ise genel olarak en-boy oranlarının yaklaşık benzer, keskin kenarlı ve poligonal şekilli olduğu görülmektedir. Resim 7.3’de farklı büyütme ölçeklerinde çekilen nikel kaplı grafit tozlarının SEM fotoğraflarından ince yassı plaka şeklinde oldukları görülmüştür.



a)

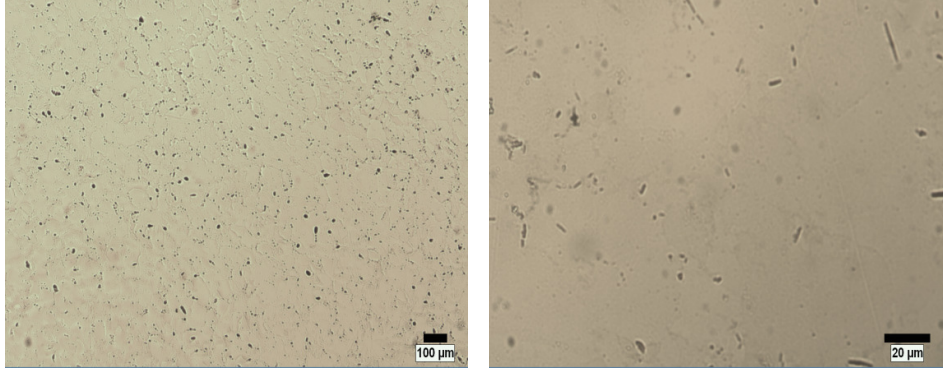
b)

Resim 7.3. Nikel kaplı grafit parçacıklarının SEM görüntüleri
a) x75 büyütme, b) x500 büyütme

7.2. Kompozit Numunelerin Metalografik İncelemeleri

Üretimi gerçekleştirilen MMK’lerin parçacık dağılımı ve takviye elemanı-matris arasındaki ara yüzey bağının kontrol edilebilmesi için numuneler hazırlanarak mikroyapı incelemeleri gerçekleştirilmiştir. Üretilen MMK numunelere ait mikroyapı fotoğrafları Resim 7.4 ila 7.14 arasında sunulmuştur. Resim 7.4’te takviyesiz olarak

üretilen Alumix 123 kodlu numunenin farklı büyütmelelerdeki mikroyapı resimleri sunulmuştur.

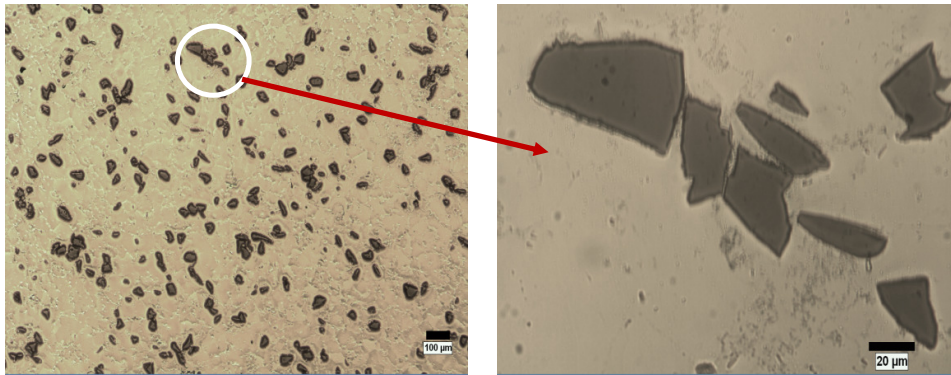


a)

b)

Resim 7.4. Alumix 123 kodlu numunenin mikroyapı görüntüleri
a) x50 büyütme, b) x500 büyütme

Resim 7.4'deki mikroyapı fotoğraflarında siyah renkli bölgelerde bakırca zengin bakır alümina (CuAl_2) intermetalik çözkelteleri ve matris malzemesinin içerdiği Si fazları göze çarpmaktadır. Mikroyapı fotoğraflarında belirgin bir gözenek varlığına rastlanmamıştır. Bu durumun Alumix 123 tozunun uygun basınç, sıcaklık ve sürede sıcak preslenmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Resim 7.5'de %5 B_4C kodlu numunenin farklı büyütmelelerdeki mikroyapı görüntüleri sunulmuştur.

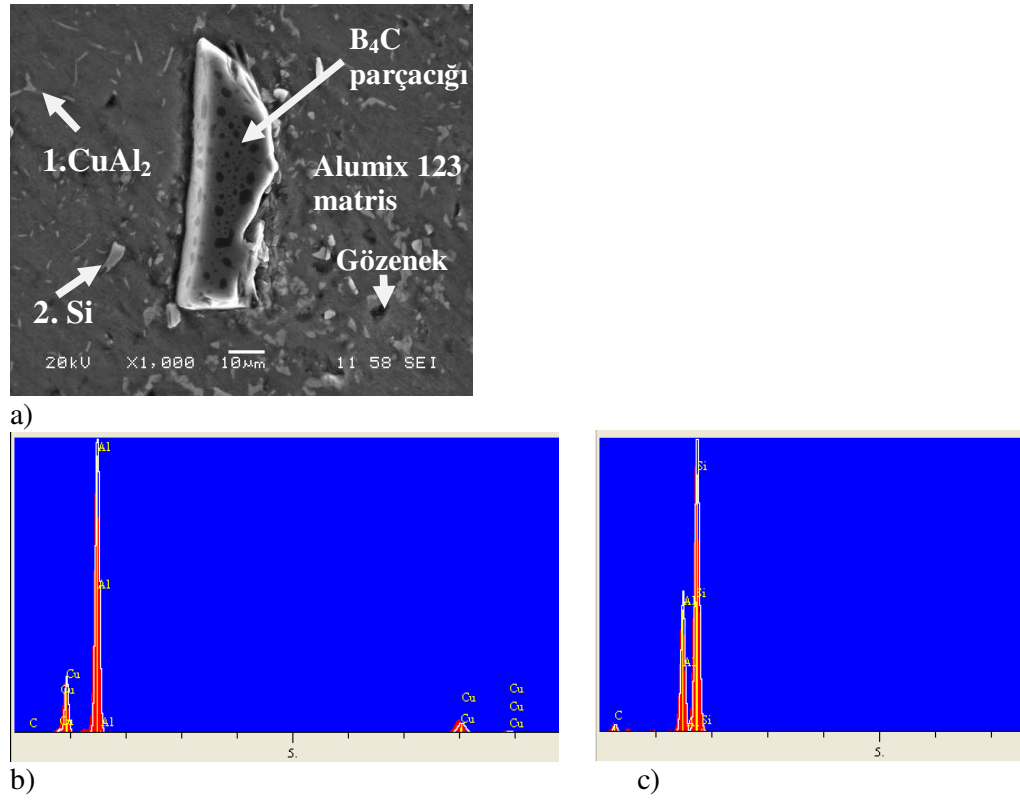


a)

b)

Resim 7.5. %5 B_4C kodlu numunenin mikroyapı görüntüleri
a) x50 büyütme, b) x500 büyütme

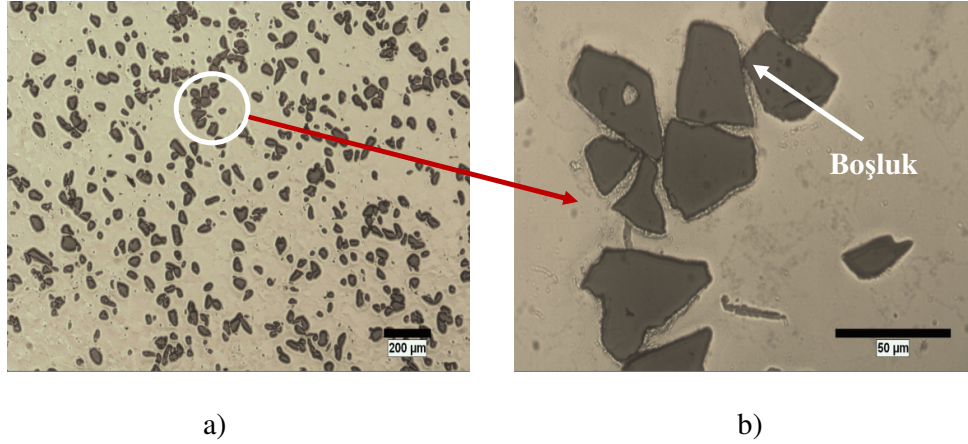
%5 B₄C kodlu kompozite ait mikroyapı resmi Resim 7.5.a incelendiğinde x50 büyütmede genel olarak parçacık dağılımının homojen olduğu kısmen kümeleşmenin var olduğu görülmektedir. Resim 7.5.a'da kısmen kümeleşmenin var olduğu, Resim 7.5.b'de x500 büyütme görüntüde ise kümeleşen partiküller arasının dahi matris tarafından sarıldığı görülmüştür. %5 B₄C takviyeli kompozitler için parçacık-matris ara yüzeyi SEM görüntüsü ve EDS analizi sonuçları Resim 7.6'da verilmiştir.



Resim 7.6. Parçacık-matris ara yüzeyi SEM görüntüsü ve EDS analizi sonuçları
a) %5 B₄C kodlu numunenin SEM görüntüsü, b) 1 nolu noktanın EDS analizi, c) 2 nolu noktanın EDS analizi

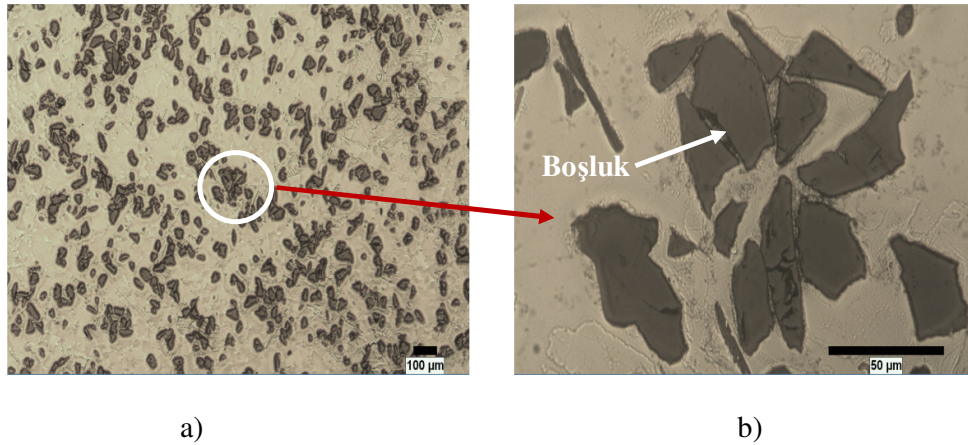
Yapılan ara yüzey incelemelerinde Al matris ile B₄C parçacıkları arasında düzenli bir ara yüzey oluşacak şekilde parçacıkların matris tarafından tamamen sarıldığı şekilde görülmektedir. Resim 7.7'de %10 B₄C kodlu numuneye ait mikroyapı resimleri verilmiştir. Resim 7.7.a'da %10 B₄C kodlu numuneye ait mikroyapı resmi incelendiğinde x50 büyütmede genel olarak parçacık dağılımının homojen olduğu artan parçacık miktarıyla birlikte yer yer kümeleşmelerinde arttığı görülmüştür. B₄C Diğer

bir ifadeyle parçacık oranı arttıkça bazı bor karbür parçacıklarının yer yer bir araya geldikleri gözlenmiştir. Resim 7.7.b’de kümeleşen parçacıklara rağmen x500 büyütme resminde matris fazının parçacıkları neredeyse kusursuz şekilde sardığı görülmüştür.



Resim 7.7. %10 B₄C kodlu numunenin mikroyapı görüntüleri
a) x50 büyütme, b) x500 büyütme

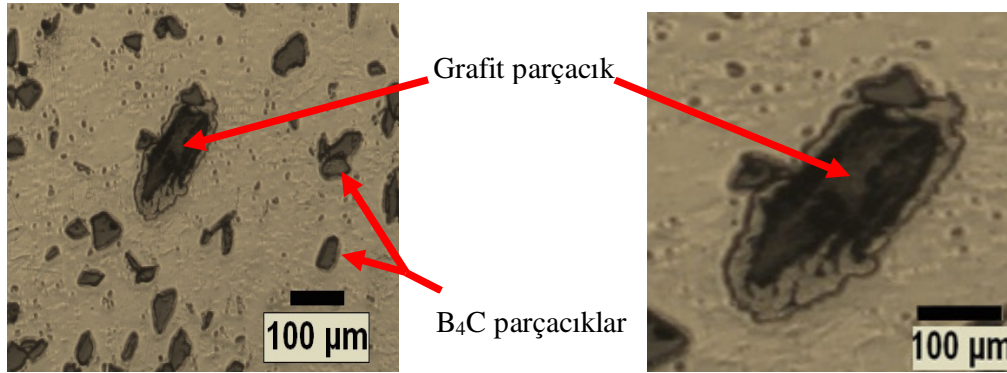
Resim 7.8’de %15 B₄C kodlu numuneye ait mikroyapı resimleri sunulmuştur. Artan takviye miktarına bağlı olarak en yüksek B₄C oranında dahi genel parçacık dağılımının homojen olduğu Resim 7.8.a’da görülmektedir. Al-B₄C malzemesinin mikroyapısı incelendiğinde yapıda çok düşük miktarlarda ve özellikle kümeleşmiş partiküller arasında gözenek olduğu görülmektedir.



Resim 7.8. % 15 B₄C kodlu numunenin mikroyapı görüntüleri
a) x50 büyütme, b) x500 büyütme

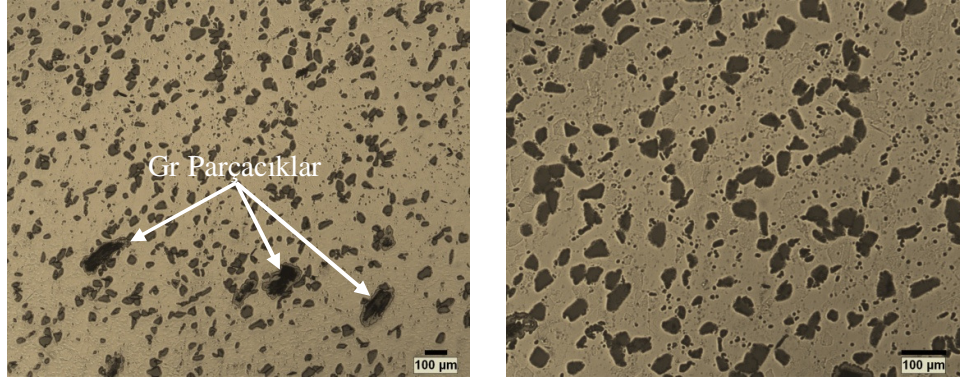
Kompozit yapı içerisindeki B₄C parçacıklarının artan oranıyla birlikte, parçacıkların kümeleşme eğiliminin arttığı tespit edilmiştir (Resim 7.8.b). Bunun bir sonucu olarak bu bölgelerde parçacıkları çevreleyen matris tazının miktarı azalmış kısmen boşluk oluşumunda artış görülmüştür.

Alüminyum ile Gr arasında istenilen özelliklere sahip güçlü bir ara yüzey bağının oluşmasının zor olduğu ve Al/Gr arasındaki reaksiyonla oluşan Al₄C₃ intermetalikinin kırılma yapısının kompozit malzemelerdeki olumsuz etkisi bilinmektedir. Bundan dolayı B₄C+Gr katkıli kompozitlerin üretiminde, yüzeyleri Ni ile kaplatılmış Gr tozları tercih edilmiştir. %1 Gr katkıli kompozitin parçacık-matris ara yüzeyi optik görüntüleri Resim 7.9'da verilmiştir.



Resim 7.9. %10 B₄C + %1 Gr kodlu numunenin optik görüntüsü

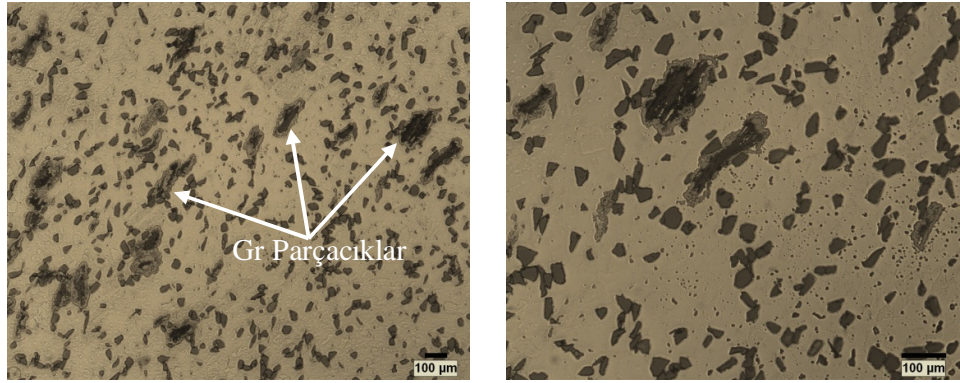
Resim 7.9'da %1 Gr katkıli kompozitin mikroyapısı incelendiğinde B₄C parçacık takviyeli numunede olduğu gibi matrisle-parçacık arasında düzenli bir ara yüzey oluştuğu görülmektedir. Yapılan ara yüzey incelemelerinde Gr parçacıklarının Ni ile kaplatılmasının alüminyum ile Gr arasındaki ara yüzey bağını iyileştirdiği görülmektedir. Ayrıca B₄C parçacıklarının matris tarafından tamamen sarıldığı belirlenmiştir. B₄C+Gr katkıli olarak üretilen kompozit numunelerin optik resimleri



a)

b)

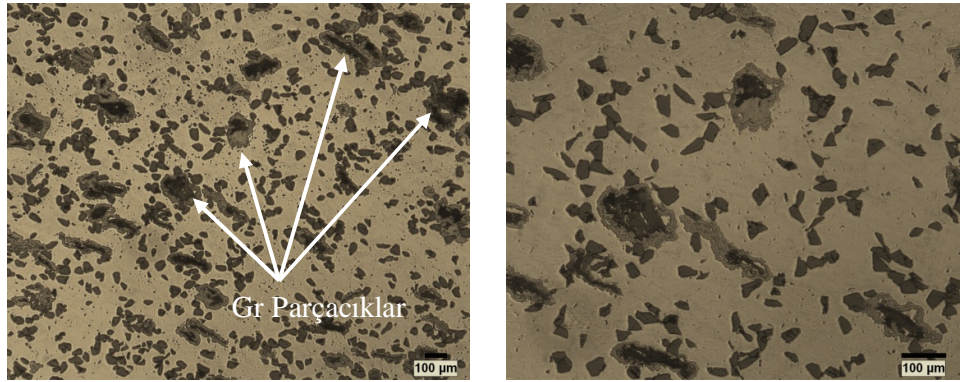
Resim 7.10. %10 B₄C + %1 Gr kodlu numunenin mikroyapı görüntüleri
a) x50 büyütme, b) x100 büyütme



a)

b)

Resim 7.11. %10 B₄C + %3 Gr kodlu numunenin mikroyapı görüntüleri
a) x50 büyütme, b) x100 büyütme



a)

b)

Resim 7.12. %10 B₄C + %5 Gr kodlu numunenin mikroyapı görüntüleri
a) x50 büyütme, b) x100 büyütme

Resim 7.10 ile 7.12 arasında sunulmuştur. Resim 7.10-7.12'de B₄C+Gr katkıli kompozitlerin mikroyapı fotoğrafları incelendiğinde bor karbür ve grafitin genel olarak homojen dağılımda olduğu görülmektedir.

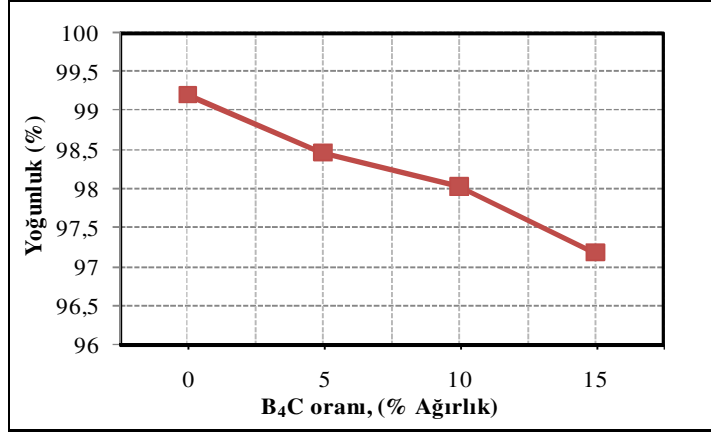
7.3. Yoğunluk Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Saf, B₄C parçacık takviyeli ve B₄C+Gr katkıli olarak üretilen numunelerin yoğunluk değerleri Arşimet prensibine göre hesaplanmıştır. Üretilen numunelerin teorik ve deneysel yoğunluklarının parçacık oranına bağlı değişimi Çizelge 7.1'de verilmiştir.

Çizelge 7.1. Üretilen numunelerin yoğunluk değerleri

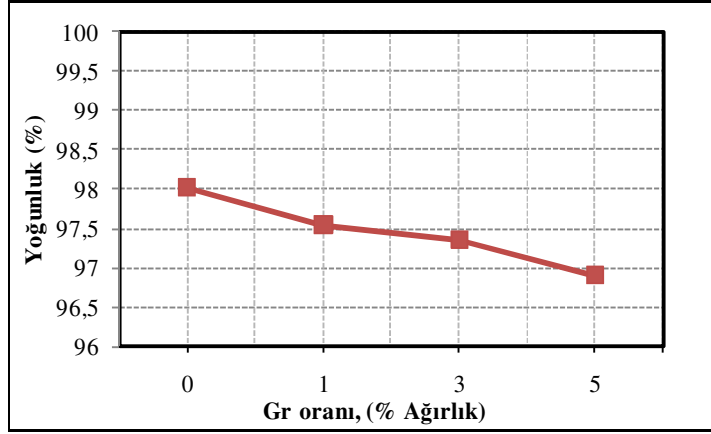
<i>Numune Kodu</i>	<i>Teorik Yoğunluk (gr/cm³)</i>	<i>Deneysel Yoğunluk (gr/cm³)</i>	<i>Deneysel Yoğunluk (%)</i>
Alumix 123	2,815	2,793	99,21
Al + %5 B ₄ C	2,800	2,757	98,46
Al + %10 B ₄ C	2,785	2,730	98,02
Al + %15 B ₄ C	2,770	2,692	97,18
Al + %10 B ₄ C + %1 Gr	2,779	2,736	97,54
Al + %10 B ₄ C + %3 Gr	2,768	2,695	97,36
Al + %10 B ₄ C + %5 Gr	2,757	2,672	96,91

Alumix 123 kodlu numunenin üretiminde %99,21 yoğunluk oranıyla neredeyse %100'e yakın yoğunluğa ulaşılmıştır. B₄C parçacık oranı ve Gr ilavesinin artması ile yoğunluk oranının (%) azaldığı görülmektedir. Artan B₄C parçacık oranına bağlı olarak yoğunluk değerleri Şekil 7.1'de sunulmuştur. Artan B₄C oranına bağlı olarak % yoğunluğun düştüğü Şekil 7.1'de görülmektedir. Bunun nedeni olarak parçacık ve grafit miktarının artmasına paralel olarak matris/ takviye ara yüzey alanının artması sonucu gözenekliliğin artması olarak söylenebilir. Özellikle artan B₄C ve Gr oranıyla birlikte takviye partiküllerinin kümeleşme eğiliminin artması, matris fazının partikül/partikül arasını yeterince dolduramaması boşluk oluşumunu arttırmaktadır. Bu durum ise % yoğunluk oranının azalmasına sebep olmaktadır.



Şekil 7.1. B₄C miktarına bağlı olarak yoğunluk değerleri

B₄C+Gr katkıli kompozitlerde artan grafit miktarına bağlı olarak üretilen numunelerin yoğunluk değerleri Şekil 7.2’de verilmiştir.



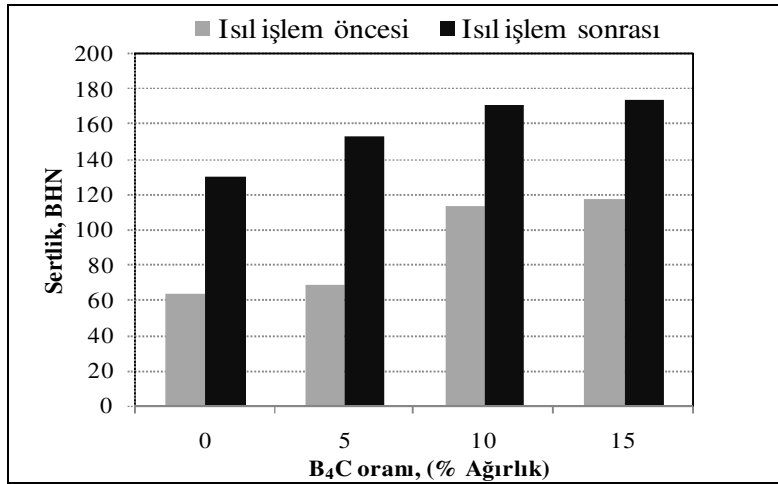
Şekil 7.2. B₄C+Gr katkıli kompozitlerin Gr miktarına bağlı olarak yoğunluk değerleri

B₄C+Gr katkıli kompozitlerde, B₄C parçacık takviyeli kompozitlerde görüldüğü gibi artan takviye oranıyla birlikte yoğunluk düşmektedir.

7.4. Sertlik Sonuçlarının Değerlendirilmesi

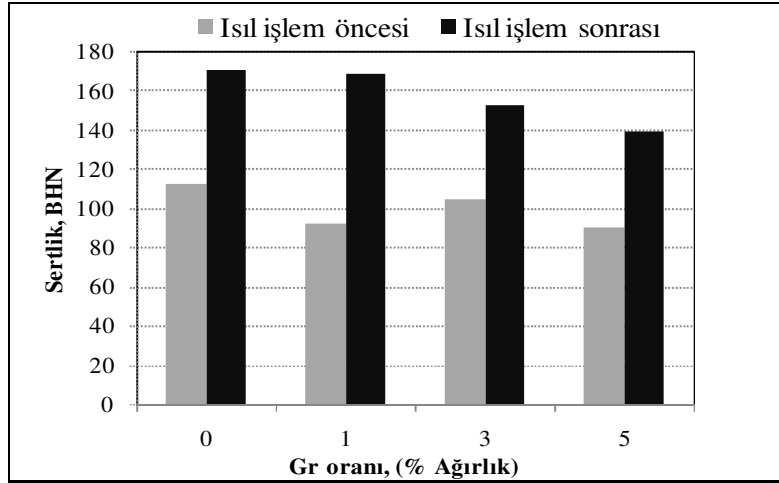
Üretilen numunelerde takviye miktarının kompozitin sertliğine etkilerinin belirlenmesi amacıyla ısı işlem öncesi ve sonrası olmak üzere numunelerin Brinell

sertlik (BHN) değerleri ölçülmüştür. Sertlik ölçümlerinde en az 5 farklı noktadan yapılan ölçümlerin aritmetik ortalaması alınmıştır. B₄C parçacık takviyeli kompozitlerin artan B₄C miktarına bağlı olarak sertlik değerleri Şekil 7.3’de sunulmuştur. B₄C parçacık takviyeli kompozitlerin kendi aralarında sertlik değeri incelendiğinde, sertliğin takviye elemanı miktarı ile doğru orantılı olarak arttığı görülmektedir. Takviye oranının artmasıyla MMK’lerin sertliğinde görülen artışın nedeni, matris-takviye elemanı ısıl genleşme katsayısı farklılıklarına bağlı olarak meydana gelen kalıcı gerilmeler, sert parçacık oranındaki artıştan kaynaklandığı söylenebilir [158]. Isıl işlem sonrasında Alumix 123 kodlu numunenin sertliğinin %105’lik bir artış gösterdiği, B₄C oranının artması ile ise sertlik % artış oranının azaldığı görülmüştür.



Şekil 7.3. B₄C miktarına bağlı olarak kompozitlerin sertlik değerleri

B₄C parçacık takviyesinin artması ile yüksek sertlik değerleri elde edilmesinden dolayı aşınmanın önemli olduğu uygulamalarda bu tür malzemeler tercih edilmelidir. En yüksek sertlik değeri, %15 B₄C takviyesi sonrasında 172,8 BHN olarak tespit edilmiştir. Isıl işlem sonrası sertlik değişimleri incelendiğinde en yüksek sertlik artışı %125 ile %5 takviyeli kompozitte sağlanmıştır. Artan Gr ilavesine bağlı olarak B₄C+Gr katkılı kompozitlerin sertlik değerleri Şekil 7.4’te sunulmuştur.



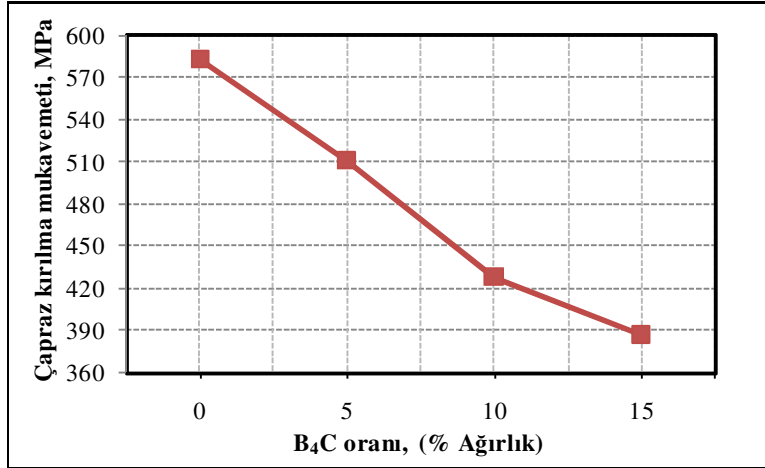
Şekil 7.4. B₄C+Gr katkıli kompozitlerin Gr miktarına bağlı olarak sertlik değerleri

Şekil 7.4’de MMK’lerin sertlik değerleri %10 B₄C takviyeli kompozite göre artan Gr miktarı ile azalmaktadır. Genellikle MMK malzemelerde matris sünek, takviye elemanı ise serttir ve oluşan kompozit malzemenin mekanik özellikleri de sert ve kırılma fazın özellikleriyle kontrol edilir. MMK malzemelerde matrise takviye fazının ilavesi, kompozitin akma ve çekme mukavemetini artırırken, tokluğun azalmasına neden olmaktadır [159,160]. MMK’lere grafitin ilavesi ile deformasyon sürecinde çatlak oluşumunun kolaylaştırma etkisinin sertlik düşmesine sebep olduğu söylenebilir.

7.5. Çapraz Kırılma Mukavemetinin Değerlendirilmesi

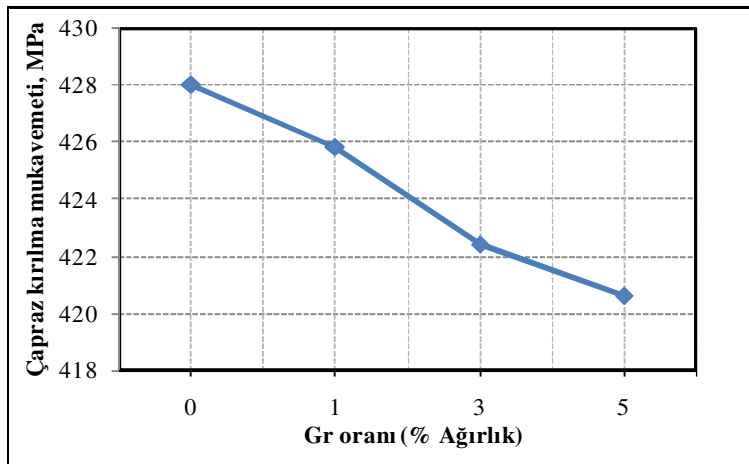
Çapraz kırılma deneyleri (ÇKM), ham dayanım değerlerinin genel bir ölçüsüdür ve düşük süneklığe sahip malzemelerin sinterlenmiş dayanımını ölçmek için kullanılır [119]. B₄C parçacık takviyeli ve B₄C+Gr katkıli kompozitlerin ÇKM sonuçları ayrı ayrı değerlendirilmiştir. Artan B₄C miktarına bağlı olarak ÇKM değerleri Şekil 7.5’de sunulmuştur. Çapraz kırılma dayanımı grafiğinden en yüksek değerleri B₄C içermeyen numunede olduğu (Şekil 7.5) görülmüştür. Bu durumun yüksek yoğunluk ve düşük gözenek miktarından dolayı çatlak oluşma eğiliminin azalmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. B₄C parçacık takviyeli kompozit numuneler

arasında en düşük ÇKM değeri %15 B₄C kodlu numunede 386,74 MPa olarak elde edilmiştir.



Şekil 7.5. B₄C miktarına bağlı olarak kompozitlerin ÇKM değerleri

B₄C miktarının artmasıyla parçacık-matris ara yüzeyi çapraz kırılma deneyi sırasında çatlak oluşturma etkisini artırarak kırılma dayanımını düşürmektedir. Viala ve arkadaşları Al-B₄C reaksiyonu sonrasında oluşan istenmeyen bir faz olan Al₄C₃ higroskopik yapısı ve zayıf mekanik özellikleri nedeniyle kompozitin kırılma tokluğunun kötü yönde etkilediğini bildirmişlerdir [161]. Şekil 7.6'da B₄C+Gr katkıli kompozitlerin artan Gr miktarına bağlı olarak ÇKM değerleri sunulmuştur.

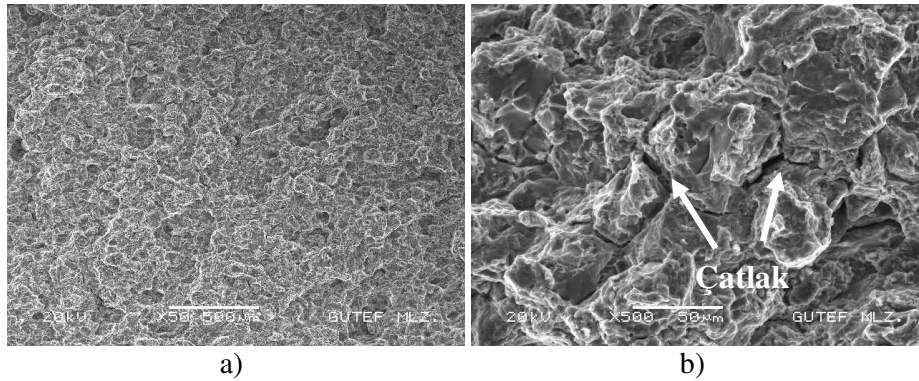


Şekil 7.6. B₄C+Gr katkıli kompozitlerin Gr miktarına bağlı olarak ÇKM değerleri

Gr miktarındaki artışa paralel olarak ÇKM değerindeki düşüş net bir şekilde görülmektedir. Bu durumun grafitin gevrek ve kırılğan yapısından aynı zamanda alüminyum ile grafit parçacıklarının arasında oluşan zayıf ara yüzey bağından kaynaklandığı düşünülmektedir. Ayrıca, Gr katkısının yüzde oranının artışıyla birlikte artan gözenek miktarının kompozitin kırılma tokluğunu (çatlak ilerlemesine karşı direncini) düşürmesine bağlanabilir. B₄C+Gr katkılı numuneler arasında en düşük ÇKM değeri %5 Gr katkılı numunede 420,64 MPa olarak elde edilmiştir.

7.6. Kırık Yüzeylerin SEM İncelemeleri

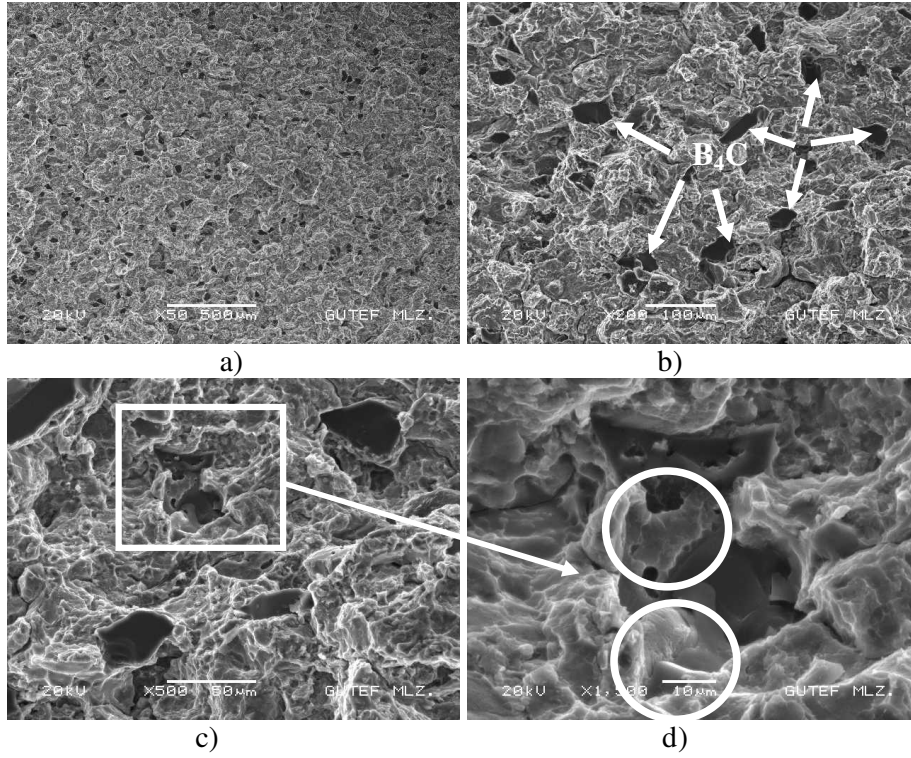
Çapraz kırılma deneyi sonrasında, kırılma mekanizmasının daha iyi anlaşılabilmesi için Alumix 123, %5, %15 B₄C takviyeli, %1 Gr ve %5 Gr katkılı kompozit numunelerin kırık yüzeyleri SEM incelemeleri ile karakterize edilmiştir. Kompozit numunelere ait kırık yüzeyden alınan SEM fotoğrafları Resim 7.13-7.15'te, Gr katkılı numunelere ait fotoğraflar ise Resim 7.16 ve Resim 7.17'de sunulmuştur.



Resim 7.13. Alumix 123 kodlu numunenin kırık yüzeyinin SEM görüntüleri
a)x50 büyütme, b) x500 büyütme

MMK'lerde kırılma üç ana kırılma mekanizmasıyla kontrol edilmektedir. Bunlar sırasıyla; ara yüzey yapışmaması, takviye partiküllerinin kırılması, boşluk çekmesi ve büyümesidir [162]. Matris alaşımının kırılma yüzeylerinde sünek ve gevrek kırılma birlikte görülmüştür. Resim 7.13.a'da beyaz renkli bölgeler sünek kırılma davranışının gerçekleştiğini gösterirken, Resim 7.13.b'de kırılma yüzeyinde yer yer çatlakların oluştuğu ve gevrek kırılmanın da gerçekleştiği görülmektedir. Resim

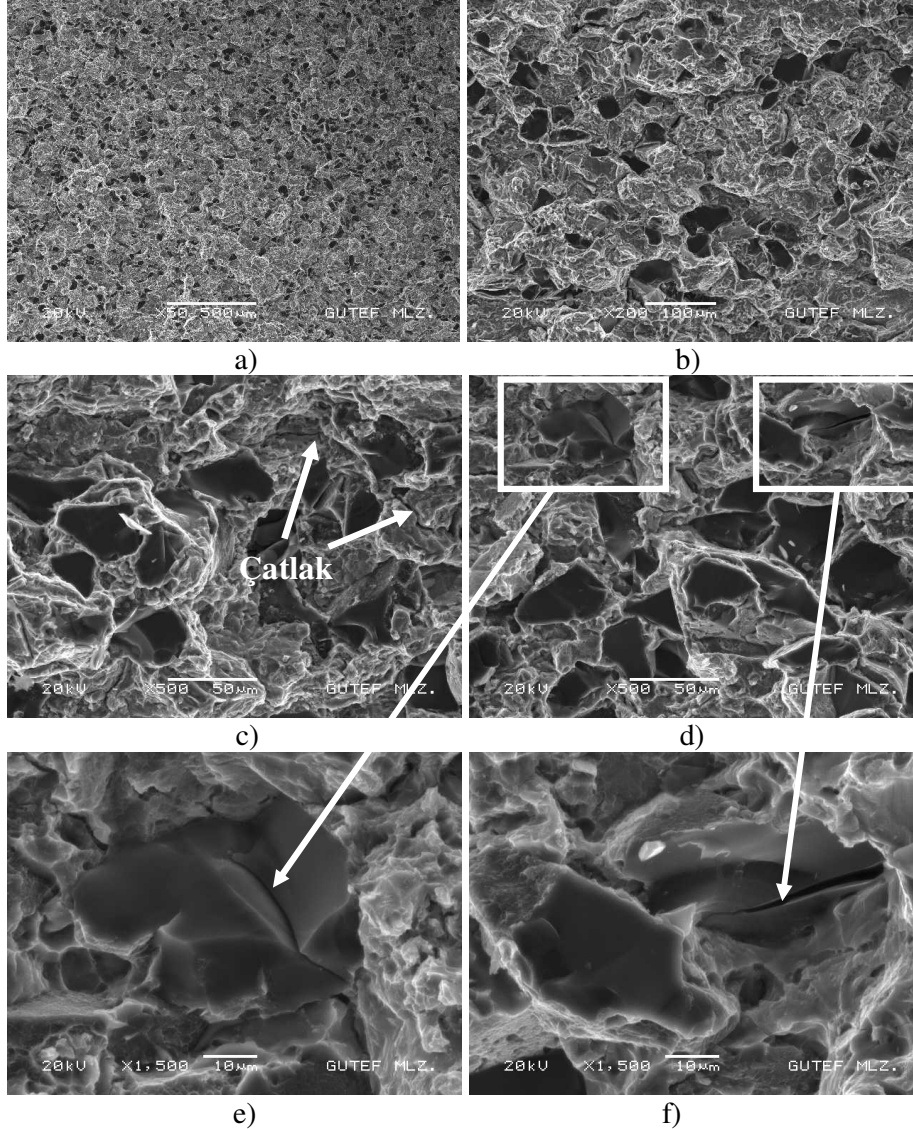
7.14'de %5 B_4C takviyeli kompozite ait kırık yüzeyin SEM görüntüleri görülmektedir. Resim 7.14'de %5 B_4C takviyeli kompozite ait kırık yüzeyi incelendiğinde dağınık halde matris içeriğindeki B_4C takviyeleri görülmektedir.



Resim 7.14. %5 B_4C takviyeli kompozitin kırık yüzeyinin SEM görüntüleri
a) x50, b) x200, c) x500, d) x1500 büyütme

Resim 7.14.a'daki SEM görüntülerinde yapı içerisine dağılan B_4C parçacıkları ve Resim 7.14.b'de B_4C parçacıklarının matris tarafından tamamen sarıldığı görülmektedir. Bu durum uygulanan presleme basıncının ve sinterleme sıcaklığının yeterli olduğunu desteklemektedir. Parçacık bulunan bölgelerde parçacık/matris ara yüzeyinde ayrışmalar şeklinde olduğu görülmektedir. Yapı içerisinden parçacıkların kopması ile ortaya çıkan parçacık şekline benzeyen düzgün kenarlı boşluklar da bu tezi doğrulamaktadır. Resim 7.14.c'de kırık yüzeyden kopan bir parçacığın oluşturduğu boşluk görülmektedir. Resim 7.14.d kopan parçacığın oluşturduğu boşluk detaylı bir şekilde incelendiğinde parçacığın koptuğu bölgeden kendisiyle birlikte matris malzemesinin de bir kısmını kopardığı görülebilir. Bu durum parçacıkların matris ile kuvvetli bir ara yüzey bağı oluşturduğunu da

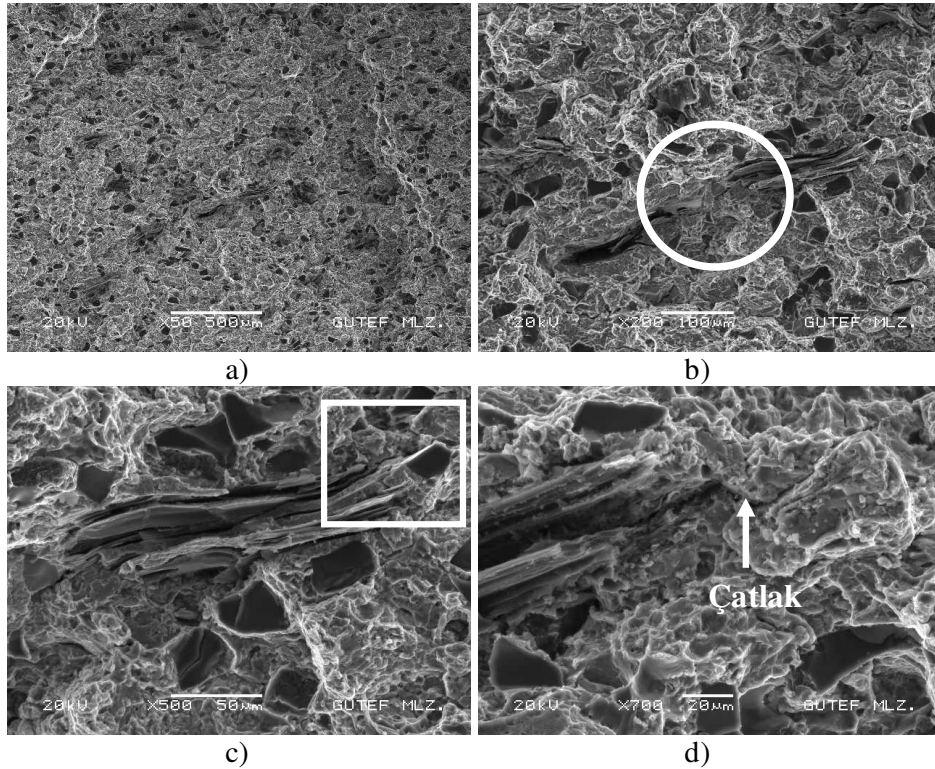
desteklemektedir. Resim 7.15’de %15 B₄C takviyeli kompozite ait kırık yüzeyin SEM görüntüleri görülmektedir. Parçacık takviyeli malzemelerin kırık yüzeylerinde yer yer parçacıkların kırılmalarının varlığı yeterli ara yüzey bağının oluştuğunu göstermektedir.



Resim 7.15. %15 B₄C takviyeli kompozitin kırık yüzey SEM görüntüleri
a) x50, b) x200, c) x500, d) x500, e) x1500, f) 1500 büyütme

%15 B₄C takviyeli kompozitte de parçacıkların homojen dağıldığı Şekil 7.15.a’da ve matris tarafından sarıldığı Şekil 7.15.b’de görülmektedir. %15 B₄C takviyeli kompozitte artan paracık oranı ile birlikte gözenekliliğin artması, matris/parçacık ara

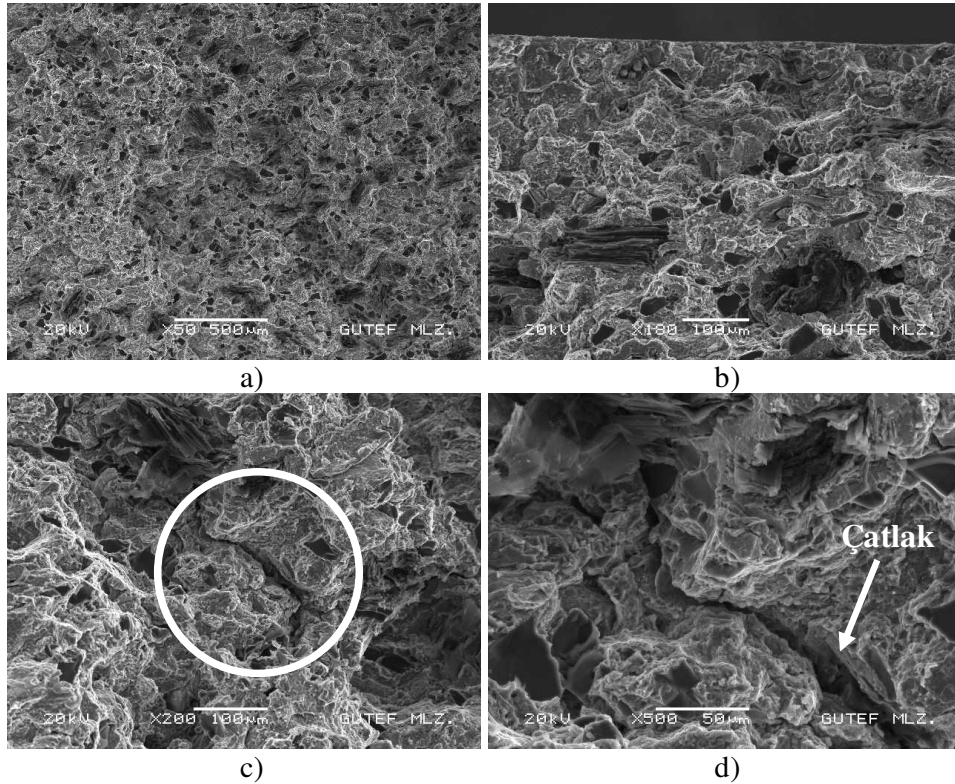
yüzey bağı hatalarını arttırmıştır. Ara yüzey bağı hataları sonrasında ara yüzey boyunca çatlak oluşumu (Resim 7.15.c) artmış numunenin daha düşük yükler altında kırılmasına neden olmuştur. Bununla birlikte zaman zaman bazı bölgelerde parçacık/matris ara yüzeyinden olmayıp parçacıkların kırılması (Resim 7.15.d) şeklinde olması iyi bir ara yüzey bağının olduğunun da göstergesidir. Takviye parçacıklarının kırılmaları Resim 7.15.e'de B_4C parçacığındaki bölgesel gerilmeye bağlıdır ve parçacığın matrise iyi bir şekilde (Resim 7.15.f) bağlandığını gösterir. Daha büyük partiküller ayrılırken plastik olarak deforme olan alüminyum matristen büyük bir yük transferine neden olur. Diğer taraftan küçük takviyeler genellikle çatlamaz. Klasik mekanizma olan boşluk büyümesi, yapışmanın tam olmaması veya partiküllerin çatlaması için gerekli olan lokal gerilmelerin olması ile açıklanabilir [128]. Resim 7.16'de %1 Gr katkılı kompozite ait kırık yüzeyin SEM fotoğrafları görülmektedir.



Resim 7.16. %1 Gr katkılı kompozitin kırık yüzey SEM görüntüleri

a) x50 büyütme, b) x200 büyütme, c) x500 büyütme, d) x700 büyütme

Resim 7.16.a'daki %1 Gr katkıli kompozite ait kırık yüzey resimleri incelendiğinde, matris içindeki B_4C parçacıkları ve Gr ilavesi görülmektedir. Gr parçacıkların yapı içerisinde düzlemsel olarak yer aldığı ve presleme sonrasında deforme olduğu tespit edilmiştir. Gr parçacıkları üzerinden çatlak oluşumun matris üzerine doğru ayrıca Gr parçacıkları arasında da çatlak oluşumu gerçekleştiği Resim 7.16.b'de görülmüştür. Deforme olmuş Gr parçacığı üzerinden çatlak eğiliminin başlaması, Resim 7.16.c'de ve çatlakın ilerleyişi ise Resim 7.16.d'de daha net görülebilir. Bu şekilde yapıdaki Gr parçacıklarının deforme olması ve grafit/matris arasındaki çatlak oluşumunun artması numunenin mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkileyeceği aşikardır. Resim 7.17'de %5 Gr katkıli kompozite ait kırık yüzeyin SEM fotoğrafları görülmektedir.



Resim 7.17. %5 Gr katkıli kompozitin kırık yüzey SEM görüntüleri
a) x50 büyütme, b) x100 büyütme, c) x200 büyütme, d) x500 büyütme

%5 Gr katkıli kompozite ait kırık yüzey fotoğraflarında (Resim 7.17.a) artan Gr miktarı ve B_4C parçacıklarının homojen dağılımı görülmektedir. Kırık yüzeyinde (Resim 7.17.b) bazı bölgelerinde gevrek kırılma, genelde ise sünek kırılma davranışı

görülmektedir. Deforme olan Gr parçacıkları ile birlikte parçacık/parçacık arasında (Resim 7.17.c) oluşan çatlak ve detaylı resmi 7.17.d'de sunulmuştur. Artan grafit miktarıyla birlikte numunenin yoğunluğunun düşmesi ve çatlak eğiliminin artışı daha düşük yükler altında numunenin kırılmasına neden olmuştur. Üretilen tüm kompozit numuneler içerisinde en düşük ÇKM bu numunede ulaşılmıştır. Buda deforme olan Gr parçacıklar arasında oluşan çatlak oluşumlarına bağlanmıştır.

7.7. İşlenebilirlik Deneyleri

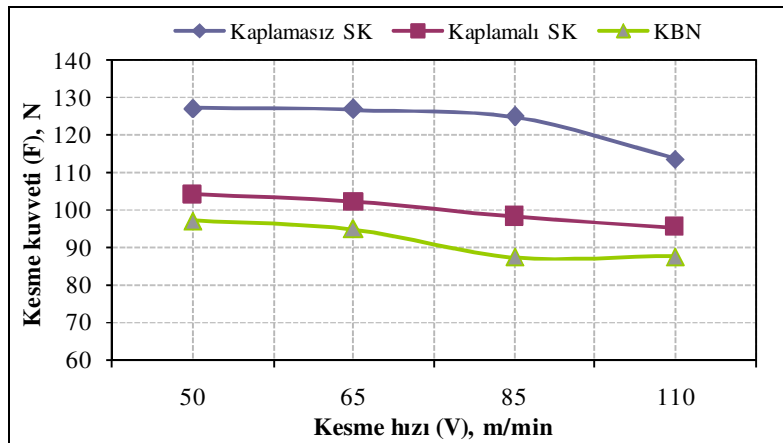
Üretimi gerçekleştirilen B_4C parçacık takviyeli ve B_4C+Gr katkılı kompozitler kesici takım ve işleme parametrelerine bağlı olarak takım aşınması, kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü açısından değerlendirilmiştir.

7.7.1. Kesme kuvvetlerinin değerlendirilmesi

Malzemelerin işlenebilirliklerinin değerlendirilmesinde temel kriterlerden bir tanesi kesme kuvvetlerinin ve talaş kaldırma için gerekli olan gücün belirlenmesidir. Kesme kuvvetlerinin ölçümü belirlenen kesme parametrelerine bağlı olarak her bir numune için 60 mm boyda düzlem yüzey frezeleme yapılarak gerçekleştirilmiştir. Kesme kuvvetlerinin ölçümü üç yönde aynı anda kuvvet ölçebilen dinamometre yardımıyla sağlanmıştır. MMK numunelerin rijit bir şekilde dinamometreye bağlanmaları bağlama kalıbı yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Her ölçüm için yeni kesici takım kullanılmıştır. Frezelemede oluşan kuvvetler teğetsel kuvvet (F_c), radyal kuvvet (F_r) ve eksenel kuvvet (F_f) olmak üzere üç yönde ölçülmüştür. Artan parçacık miktarına bağlı olarak B_4C parçacık takviyeli ve B_4C+Gr katkılı kompozitler kesme kuvvetleri bakımından ayrı ayrı değerlendirilmiştir. Daha sonra her bir numune artan kesme hızına bağlı olarak kesme kuvvetleri ve kuvvet bileşenleri açısından detaylı incelenmiştir.

Alumix 123 kodlu numunenin işlenmesinde kesme kuvveti ve bileşenlerinin değerlendirilmesi

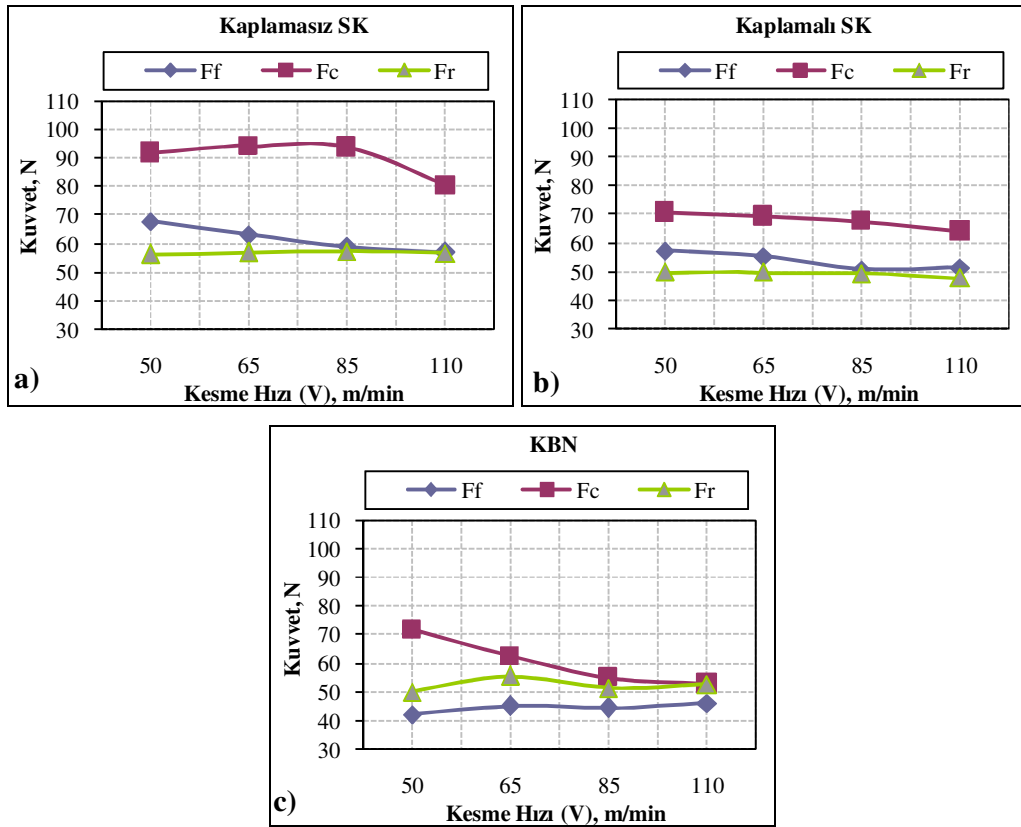
Alumix 123 kodlu numunenin kesme hızına bağlı olarak kesici takımlarla işlenmesi esnasında elde edilen kesme kuvvetleri Şekil 7.7’de sunulmuştur. Şekil 7.7 incelendiğinde, Alumix 123 kodlu numunenin işlenmesinde kesme kuvvetleri genel olarak tüm kesici takımlar için kesme hızının artmasıyla birlikte kesme kuvvetlerinde bir düşüş görülmektedir. Kesme hızının artmasına bağlı olarak kesme kuvvetlerindeki bu düşme eğilimi, birinci ve ikinci deformasyon bölgesindeki sıcaklığın artması ile malzemenin kayma gerilmesinin azalmasına bağlanabilir [167, 168].



Şekil 7.7. Alumix 123 kodlu malzemenin işlenmesinde değişen kesme hızlarında kesme kuvvetinin değişimi

İşleme deneylerinde en yüksek kesme kuvveti değerine 127,16 N olarak kaplamasız SK takımına ulaşılmıştır. Gerek kesme kuvvetleri, gerek kesme işlemi boyunca oluşan sıcaklık, sürtünme koşullarından birinci derecede etkilenen parametredir. En yüksek kesme kuvveti değerine kaplamasız SK takımına ulaşılmasında kesicinin yüksek sürtünme katsayısı ve yüzey pürüzlülüğüne sahip olmasından dolayı takım/talaş temas bölgesi uzunluğunun artması gösterilebilir. KBN kesici takımında ise artan kesme hızıyla birlikte 65 m/min’e kadar kesme kuvvetlerinde belirgin bir değişim (%2,4) görülmezken, 85 m/min kesme hızına gelindiğinde kuvvetlerde %8,6’lık bir düşüş gerçekleşmiştir. Takımlar kendi aralarında değerlendirildiğinde; kaplamalı SK

takım, kaplamasız kesici karşısında kesme kuvvetleri bakımından belirgin bir düşüş göstermiştir. Bu durum takıma uygulanan TiN kaplamanın düşük sürtünme katsayısına bağlanabilir. Ayrıca kaplamalı SK kesicinin KBN kesiciye yakın performans sergilediği görülmektedir. Bu durum kaplamalı kesici takımın aşınma direnci ve kararlı yığıntı talaş oluşumuna bağlı değişen kesme geometrisine bağlanmaktadır. Alumix 123 kodlu numunenin işlenmesinde kesme kuvvetlerinin en yüksek değerine (127,16 N) 50 m/min kesme hızında, kaplamasız SK kesiciyle; en düşük kesme kuvveti değerine (87,37 N) ise 85 m/min kesme hızında KBN kesici takımla ulaşılmıştır. Alumix 123 kodlu numunenin işlenmesinde elde edilen kesme kuvveti bileşenleri Şekil 7.8’de sunulmuştur.



Şekil 7.8. Alumix 123 kodlu numunenin işlenmesinde kesme hızına bağlı olarak ölçülen kesme kuvveti bileşenleri

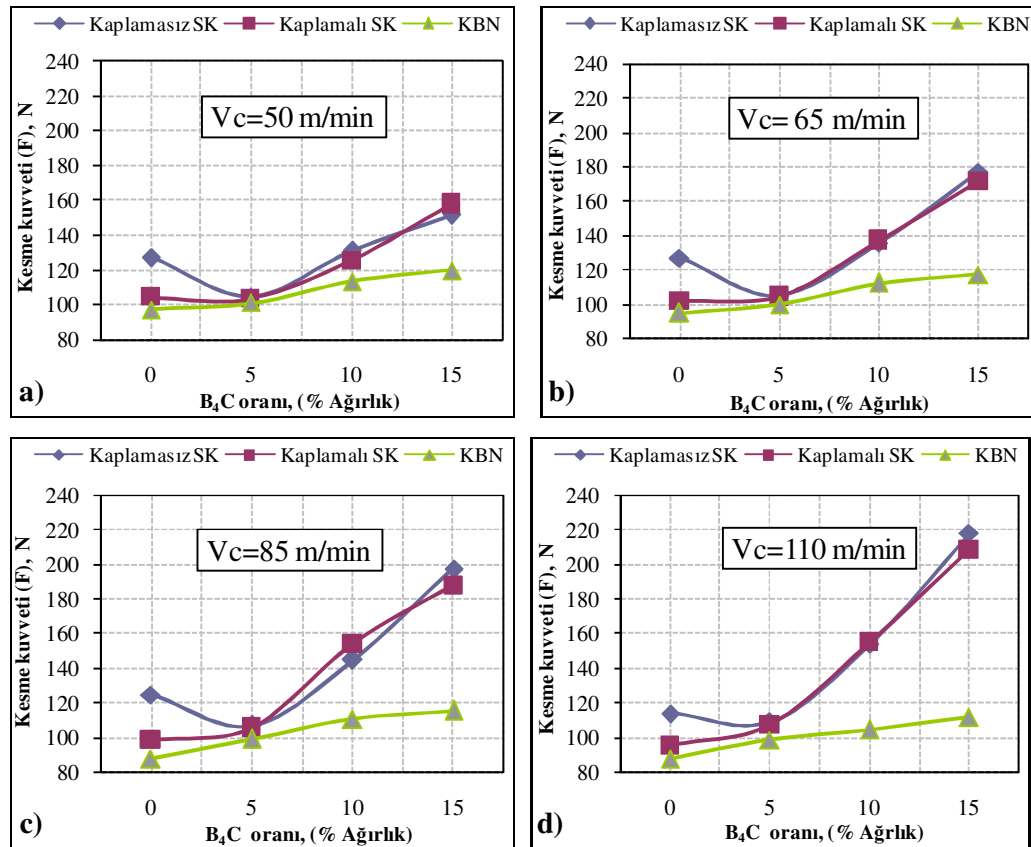
a) Kaplamasız SK, b) Kaplamalı SK, c) KBN kesici

Tüm takımlar açısından artan kesme hızıyla birlikte kuvvet bileşenlerinde genel olarak bir düşüş görülmektedir. Şekil 7.8 değerlendirildiğinde, kesme kuvveti bileşenlerinden ilerleme yönündeki kuvvet (F_f) ve radyal kuvvetin (F_r) birbirine yakın, teğetsel kuvvete (F_c) göre ise daha düşük değerlerde oluştukları tespit edilmiştir. Buradan F_c 'nin talaş kaldırmak için gerekli olan esas kuvvet olduğu görülmektedir. Kaplamasız SK kesicide (Şekil 7.8.a) artan kesme hızıyla birlikte F_r kuvvetinde bir değişim görülmezken, F_f kuvvetinde %15,7'lik bir düşüş görülmüştür. F_c kuvvetinde ise kesme hızındaki artışa bağlı olarak 85 m/min kesme hızına kadar %2,2'lik bir artış, 110 m/min kesme hızına gelindiğinde ise %17,1'lik bir düşüş gerçekleşmiştir. Kaplamalı SK kesicide (Şekil 7.8.b) F_f ve F_c kesme kuvveti bileşenlerinde artan kesme hızına bağlı olarak çok belirgin olmamakla birlikte paralel bir düşüş tespit edilmiştir. F_r kuvvetinde ise kesme hızına bağlı olarak herhangi bir değişim görülmemektedir. Alumix 123 kodlu numunenin KBN kesici ile işlenmesinde (Şekil 7.8.c) kesme kuvveti bileşenleri incelendiğinde; F_c kuvvetinde 110 m/min kesme hızında malzemenin plastik deformasyonuna bağlı olarak %35'lik belirgin bir düşüş görülmüştür. Eksenel kuvvet F_r 'nin, radyal kuvvet F_f 'den daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu durum KBN kesicinin kesme hattı kenarı boyunca 0,1 mm genişlik ve negatif yönde 10° açıda yer alan köşe pahına bağlanmıştır. Kesme kuvveti bileşenleri incelendiğinde teğetsel kuvvetin (F_c) en düşük değerine (53 N) KBN kesici takımla 110 m/min kesme hızında ulaşılmıştır. Tüm kesiciler açısından F_r kuvvetinde belirgin bir fark görülmezken en düşük değerine 110 m/min kesme hızında (48 N) kaplamalı SK kesicide tespit edilmiştir. İlerleme yönündeki F_f kesme kuvveti bileşeninin en düşük değerine ise 50 m/min kesme hızında (42,11 N) olarak belirlenmiştir.

B₄C parçacık takviyeli kompozitlerin işlenmesinde B₄C parçacık % miktarına bağlı kesme kuvvetlerinin değerlendirilmesi

Kesici takımların talaş kaldırma esnasındaki kesme gücü ve takım ömürleri tayininde kesme kuvvetlerinin büyük bir öneme sahip olduğu bilinmektedir. Kesme işlemi esnasında oluşan kuvvetler incelenerek takım ömürlerinin değerlendirmeleri yapılabilmektedir. Buna bağlı olarak artan B₄C parçacık miktarına bağlı olarak farklı

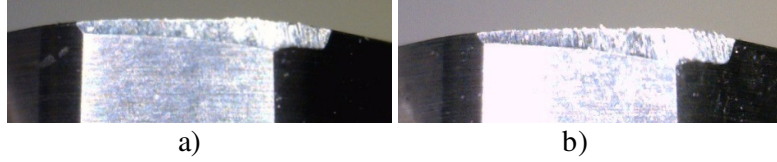
kesme hızlarında tüm kesicilerle elde edilen kesme kuvvetleri Şekil 7.9'da sunulmuştur. Şekil 7.9'da tüm kesiciler artan B_4C parçacık % oranına bağlı olarak değerlendirildiğinde; SK takımlarda %5 parçacık takviyesine kadar kesme kuvvetlerinde bir düşüş görülmüştür. Bu durum %5 parçacık takviyesiyle birlikte malzemede mikro çatlak oluşumunun artarak talaşın kolay şekillenmesi ve YT oluşumunun azalması ile açıklanabilir. Bu orandan sonra, artan parçacık miktarıyla birlikte kuvvetlerde %93'e varan bir artış görülmektedir. Kuvvetlerdeki bu artış B_4C parçacıklarının yüksek doğal sertliği karşısında karbür yapının etkin bir dayanım gösterememesine bağlanmıştır. Ayrıca artan takviye oranı ile birlikte kaplamalı ve kaplamasız SK kesicilerin birbirine oldukça yakın performans sergilediği görülmüştür.



Şekil 7.9. Farklı kesme hızlarında % B_4C parçacık miktarına bağlı olarak ölçülen kesme kuvvetleri

a) 50 m/min, b) 65 m/min, c) 85 m/min, d) 110 m/min kesme hızında

KBN kesicilerde ise artan parçacık miktarıyla birlikte kuvvetlerin kesme hızına bağlı olarak arttığı görülmüştür. Artan parçacık oranı MMK'lerin sertliğini arttırmış, kesicinin kesme hattı kenarı boyunca (2,12 mm genişlik) yer alan köşe pahının matris malzemesine batmasını zorlaştırmıştır. Böylelikle radyal kuvvet (F_r) artmıştır. Ayrıca kesiciye birim zamanda temas eden parçacık miktarının artması da F_c ve F_f kuvvet bileşenlerinin artmasına neden olmuştur. Bu üç kuvvet bileşenlerinin artması, kesme kuvvetinin artışına neden olmuştur. Bütün kesici takımlar, kesme kuvvetleri bakımından %5 takviyeli kompozitin işlenmesinde tüm kesme hızları için birbirlerine yakın performans sergilemişlerdir. Fakat artan takviye oranıyla (%10) birlikte KBN kesici takım SK kesiciler karşısında kesme hızına bağlı olarak kuvvetlerde %16~%48'lik bir düşüş göstermiştir. %15 takviye oranına gelindiğinde ise, KBN kesici artan kesme hızına bağlı olarak kesme kuvvetlerinde (32~106 N) arası bir düşüş göstermiş ve SK kesiciler karşısında %31,8~%95'lik belirgin bir fark ortaya koymuştur. Bu durum KBN kesicinin aşınma direnci ile birlikte, yüksek sıcaklıklarda çok yüksek sertlik ve kimyasal aşınma direnci gibi mükemmel malzeme özelliklerine sahip olması, özellikle yüksek kesme hızlarında daha kararlı direnç göstermesine bağlanmaktadır [163]. Takımlar kesme hızındaki artışa bağlı olarak değerlendirildiğinde ise; kaplamalı ve kaplamasız SK kesicilerde artan kesme hızıyla birlikte kuvvetlerde %30'a varan bir artış görülmüştür. Genel olarak birçok malzemede artan kesme hızıyla birlikte kesme kuvvetlerinde bir azalma beklenilirken, burada ciddi bir artış sağlanmıştır. Bu artışın nedeni olarak MMK'in yapısındaki sert parçacıkların neden olduğu başta abrasiv ve adhesiv aşınma mekanizmaları ile SK kesicilerin aşınmaları gösterilebilir. Belirlenen bu sonuç literatürdeki [164] çalışma ile paralellik arz etmektedir. Artan kesme hızının takım aşınması üzerindeki etkilerinin belirlenmesi amacıyla %10 B₄C takviyeli numune en düşük (50 m/min) ve en yüksek (110 m/min) kesme hızlarında işlenerek takım aşınmaları incelenmiştir. Deneyler kaplamasız SK kesici ile kesme kuvvetleri bölümünde açıklanan kararlı kesme mesafesi boyunca (5~6 mm) işlenerek gerçekleştirilmiştir. Ayrıca kesici takımlara ait aşınma resimleri Resim 7.18'de sunulmuştur. İşlenebilirlik deneyleri sonucunda kesici takım esas kesme kenarı yan yüzeyinde oluşan aşınma değerleri 50 m/min ve 110 m/min kesme hızlarında sırasıyla 0,324 ve 0,349 mm olarak ölçülmüştür.

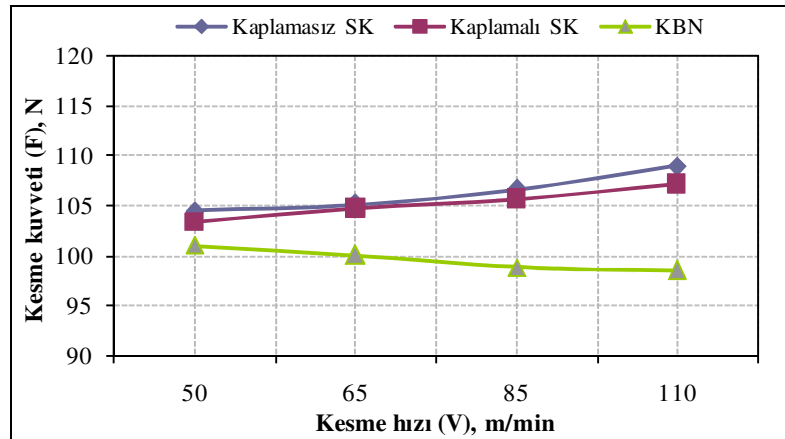


Resim 7.18. %10 B₄C takviyeli MMK'in kaplamasız SK takım ile 5~6 mm işlenmesinde esas kesme kenarı yan yüzeyinde oluşan aşınmalar a)50 m/min, b) 110 m/min kesme hızında

Bu durumda artan kesme hızıyla birlikte kesme kuvvetlerindeki artışı desteklemektedir. KBN kesici takımında ise artan kesme hızı kesme kuvvetlerinin düşmesine sebep olmuştur. KBN kesicide kesme hızındaki artışa paralel olarak kuvvetlerde görülen bu düşüş kesme bölgesinde oluşan sıcaklıklara atfedilebilir. Kesme hızının artışına bağlı olarak kuvvetlerdeki en belirgin düşüş kaplamasız SK takım ile takviyesiz numunenin işlenmesinde tespit edilmiştir. Kaplamasız SK kesici ile takviyesiz numunenin 50 m/min kesme hızında (Şekil 7.9.a) işlenmesinde 130 N'a yakın kuvvet ölçülmüştür. KBN kesici ile kesme hızında %120'lik artışla 110 m/min'e gelindiğinde (Şekil 7.9.d) kesme kuvvetlerinde %13,7'lik düşme görülmüştür. Bu durum kesme bölgesindeki artan sıcaklıkla birlikte malzemenin plastik deformasyonun kolaylaşması ve iş parçasındaki ısıl yumuşama neticesinde takım/talaş ara yüzeyindeki sürtünmenin azalmasına bağlanmaktadır [165]. Kesici takımlar kesme kuvvetleri bakımından kendi aralarında değerlendirildiğinde ise en iyi performansı KBN kesici takım göstermiştir. KBN kesici takımını sırasıyla kaplamalı SK ve kaplamasız SK takımlar takip etmiştir. Kaplamalı SK takımın kaplamasız SK karşısında gösterdiği bu performans, ana karbür yapısından daha sert olan çok katlı (özellikle TiN ve TiC) kaplamanın yüksek kesme hızlarında kesici takım esas kesme yüzeyindeki dinamik talaş yapışmasından daha az etkilenmesi [56], ve kesici takım talaş yüzeyinde takım/talaş temas uzunluğunu kısaltmasına bağlanmaktadır [166]. Kaplamalı SK kesici takım, %10 parçacık oranı, 85 m/min kesme hızı ve %15 parçacık oranı, 50 m/min kesme hızında kaplamasız SK karşısında daha kötü performans sergilemiştir. Bu duruma kaplama tabakası kalkmasının sebep olmuştur. B₄C parçacık takviyeli olarak üretilen MMK'lerin artan B₄C miktarına bağlı olarak işlenebilirliklerinin daha detaylı incelenebilmesi için Şekil 7.10-7.16'da kesme kuvvetleri ve kuvvet bileşenleri farklı şekillerde gruplanmış olarak grafiklerle sunulmuştur.

%5 B₄C takviyeli kompozitin işlenmesinde kesme kuvveti ve bileşenlerinin değerlendirilmesi

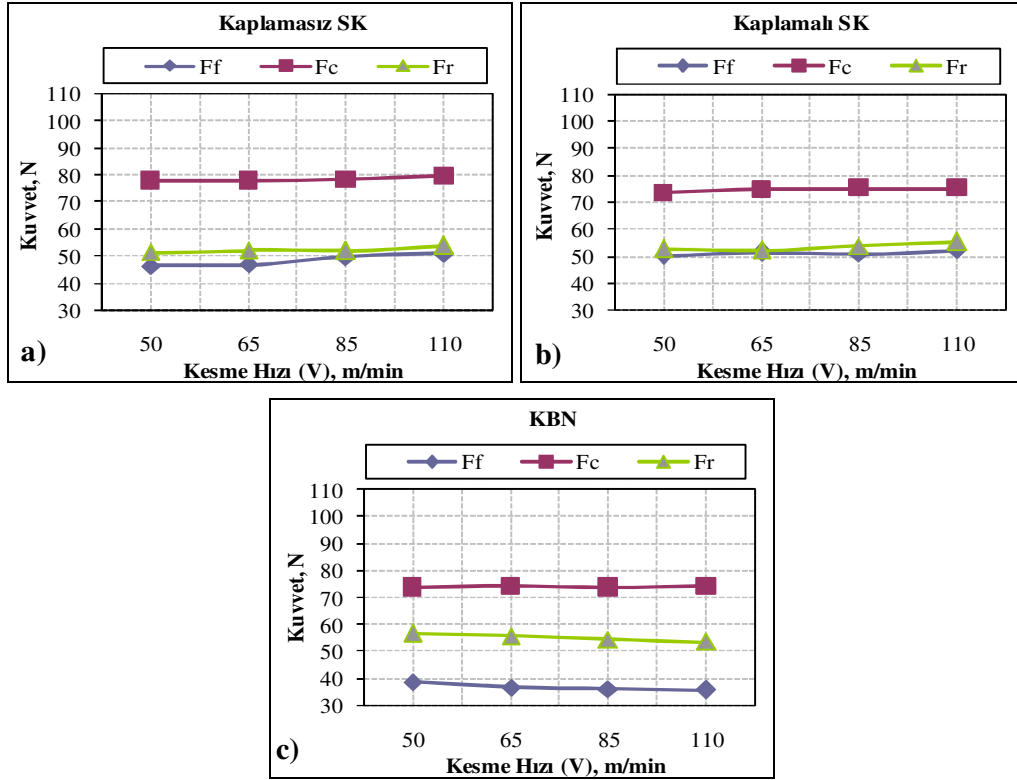
%5 B₄C takviyeli kompozitin kesme hızına bağlı olarak kesici takımlarla işlenmesi esnasında elde edilen kesme kuvvetleri Şekil 7.10'da sunulmuştur. %5 B₄C takviyeli kompozitin işlenmesinde kesme kuvvetleri Şekil 7.10 incelendiğinde artan kesme hızıyla birlikte kaplamalı ve kaplamasız SK kesiciler için kesme kuvvetlerinde (~%5'lik) paralel bir artış, KBN kesicide ise kesme hızına bağlı olarak kuvvetlerde bir düşüş görülmektedir.



Şekil 7.10. %5 B₄C takviyeli kompozitin işlenmesinde değişen kesme hızlarında kesme kuvvetinin değişimi

Kaplamalı ve kaplamasız SK kesicilerde kesme kuvvetlerindeki artışa, takviye elemanının abrasiv aşındırıcı etkisi nedeniyle takımlarda etkin şekilde görülen aşınmanın neden olduğu düşünülmektedir. En yüksek kesme kuvvetlerine kaplamasız SK kesicide ulaşılmıştır. Bunun nedeni olarak yüksek sürtünme katsayısı nedeni ile kaplamasız takımlarda kesme bölgesinde verimli bir şekilde yağlama sağlanamamış, yan yüzey ve talaş yüzeyi boyunca hareket eden talaşların hareketlerinin engellenememesi ve yan yüzey aşınmasının artmasıdır [169]. Kaplamalı SK takımın kaplamasız SK karşısındaki performansı TiN kaplamanın sertliği ve düşük sürtünme katsayısına bağlanabilir. KBN kesicilerde ise, kesme hızı artınca kesme bölgesinde oluşan yüksek sıcaklıklar kesme kuvvetlerinin düşmesine neden olmaktadır. KBN kesicilerin doğal setliğinin B₄C parçacıklardan yüksek olması, kesici takımı abrasiv

aşınmaya karşıda korumuştur. %5 B₄C takviyeli kompozitlerin işlenmesinde en yüksek (108,95 N), 110 m/min kesme hızında kaplamasız SK kesiciyle ulaşılmıştır. En düşük kesme kuvveti değeri (98,54 N) ise KBN kesici takımla 110 m/min kesme hızında ulaşılmıştır. %5 B₄C takviyeli kompozitin işlenmesinde kesme kuvveti bileşenleri Şekil 7.11’de sunulmuştur.



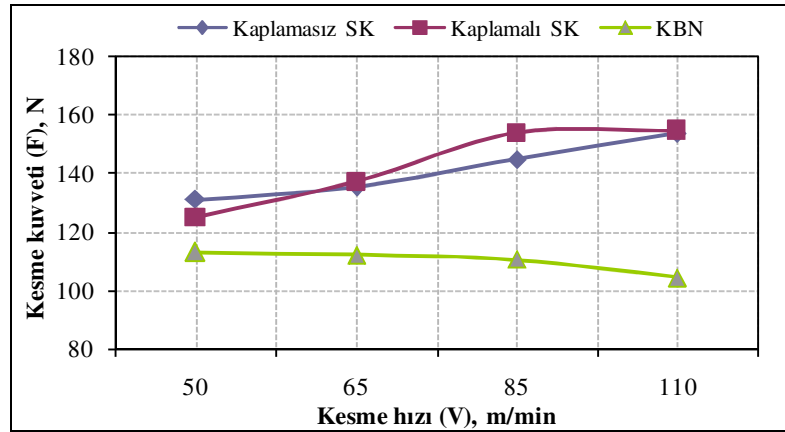
Şekil 7.11. %5 B₄C takviyeli kompozitin işlenmesinde kesme hızına bağlı olarak ölçülen kesme kuvveti bileşenleri
a) Kaplamasız SK, b) Kaplamalı SK, c) KBN kesici

Şekil 7.11 incelendiğinde Tüm kesici takımlar için kesme kuvveti bileşenleri en yüksek kuvvet değeri, dinamometre F_y yönünde ölçülen esas kesme kuvvetinde (F_c) tespit edilmiştir. Esas kesme için gerekli olan kuvvetin F_c olduğu ve tüm kesiciler için birbirine yakın değerlerde olduğu belirlenmiştir. Esas kesme kuvvetleri arasındaki bu yakınlık kompozit malzemelerin içerisindeki B₄C oranının düşük olmasından kaynaklandığı ve tüm kesiciler arasındaki farkın ortaya çıkmasını engellediği düşünülmektedir. SK kesiciler için ilerleme kuvveti ile radyal kuvvetin

birbirine yakın değerlerde ve yaklaşık olarak 50 N olduğu (Şekil 7.11.a,b) görülmektedir. KBN kesicide ise kuvvet bileşenleri arasında belirgin bir farkın olduğu görülmüştür (Şekil 7.11.c). Tüm kesiciler için kuvvet bileşenleri arasında en yüksek kuvvet değerine 110 m/min kesme hızında kaplamasız SK kesici takımında 79,66 N olarak ulaşılmıştır. En düşük kuvvet değeri ise KBN kesici takımla 110 m/min kesme hızında 35,75 N olarak belirlenmiştir.

%10 B₄C takviyeli kompozitin işlenmesinde kesme kuvveti ve bileşenlerinin değerlendirilmesi

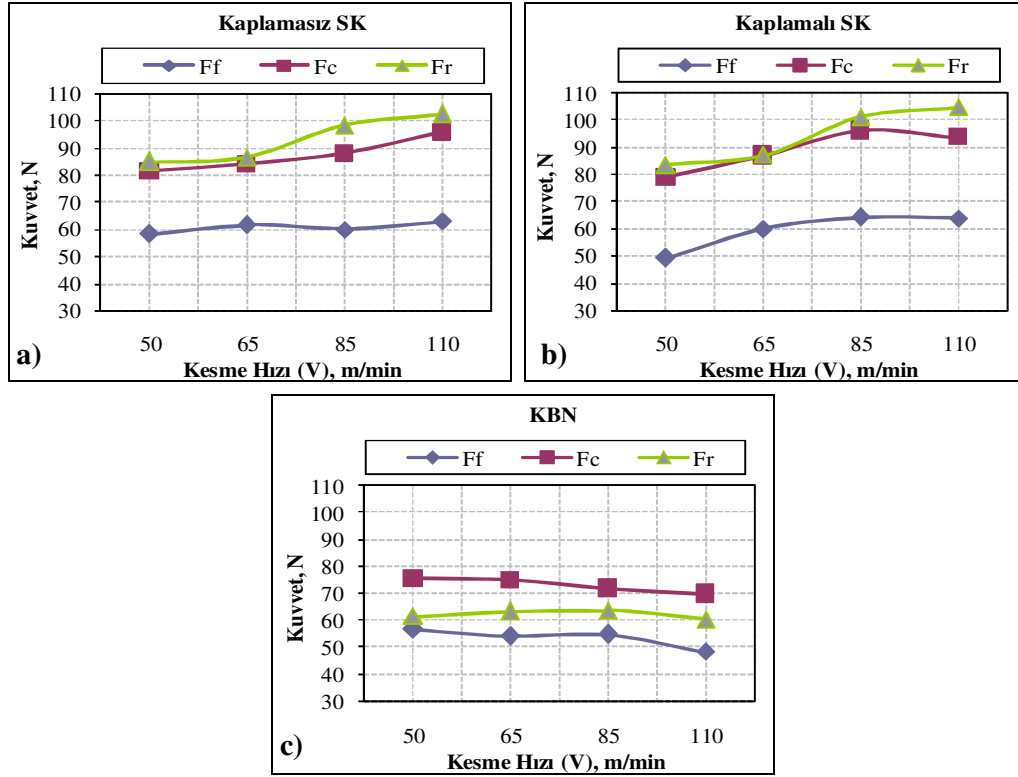
%10 B₄C takviyeli kompozitin kesme hızına bağlı olarak kesici takımlarla işlenmesi esnasında elde edilen kesme kuvvetleri Şekil 7.12’de sunulmuştur.



Şekil 7.12. %10 B₄C takviyeli kompozitin işlenmesinde değişen kesme hızlarında kesme kuvvetinin değişimi

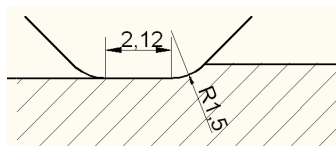
%10 B₄C takviyeli kompozitte kesme kuvvetleri kesme hızına göre değerlendirildiğinde %5 B₄C takviyeli kompozit ile benzer eğilim göstermektedir (Şekil 7.12). Artan takviye miktarına bağlı olarak malzemenin sertliği ve aşınma direncindeki artışla birlikte SK kesici takım başta olmak üzere, B₄C parçacıklarının yol açtığı abrasiv, adhasiv ve diğer aşınma mekanizmalarıyla artan takım hasarına bağlı olarak kesme kuvveti belirgin bir artış sergilemiştir. KBN kesicide ise kuvvetler kesme hızına paralel olarak düşmüştür. %10 B₄C takviyeli kompozitin frezelenmesi esnasında oluşan “F” kesme kuvveti, kesici takım malzemeleri

açısından değerlendirildiğinde; kaplamalı SK kesici 50 m/min kesme hızında kaplamasız SK kesiciye oranla kuvvetlerde %4,7 bir düşüş tespit edilmiştir. Kesme hızının 50 m/min'den %120'lik bir artışla 110 m/min'e çıkartılmasıyla SK kesiciler arasında belirgin bir fark görülmezken; KBN kesicide ise SK kesiciler karşısında %47'lik bir fark görülmüştür. 65 m/min kesme hızından sonra kaplamalı SK kesicide kesme kuvvetindeki artışın nedeni olarak başta seramik takviye elemanından kaynaklanan abrasiv ve adhesiv aşınma mekanizmalarıyla kaplama katmanının ve kesici takım kesme hattının hasara uğraması söylenebilir. KBN kesicide 85 m/min kesme hızına kadar kesme kuvvetlerinde ciddi bir düşüş görülmemiş, fakat 110 m/min kesme hızına gelindiğinde %16'lık bir düşüş yaşanmıştır. Bu kuvvet düşüşü artan kesme hızına bağlı olarak kesme bölgesinde, özellikle birinci ve ikincil deformasyon bölgesinde artan sıcaklık ile plastik deformasyonun kolaylaşmasına bağlanmıştır. %10 B₄C takviyeli kompozitin işlenmesinde elde edilen kesme kuvveti bileşenleri Şekil 7.13'de sunulmuştur. Şekil 7.13'de kesme kuvveti bileşenleri incelendiğinde SK kesicilerde artan kesme hızıyla birlikte tüm kuvvet bileşenlerinde bir artış görülmüştür. Kaplamasız ve kaplamalı SK kesicide 65 m/min kesme hızına kadar teğetsel kuvvet (F_c), radyal (F_r) kuvvette belirgin bir değişim görülmemektedir. SK kesicilerde radyal (F_r) ve teğetsel (F_c) kuvvetin birbirine yakın olduğu görülmüştür. Ayrıca 65 m/min'den sonra artan kesme hızıyla birlikte, SK kesicilerle işlenmesinde en yüksek kesme kuvveti bileşeninin %20'lik bir artışla radyal kuvvet (F_r) olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 7.13. % 10 B₄C takviyeli kompozitin işlenmesinde kesme hızına bağlı olarak ölçülen kesme kuvveti bileşenleri
a) Kaplamasız SK, b) Kaplamalı SK, c) KBN kesici

Bunun nedeni olarak parçacık miktarının yüzde hacim oranındaki artışa bağlı olarak abrasiv ve adhesiv aşınma mekanizmalarıyla birlikte esas kesme geometrisinin (Resim 7.23.a) bozulmasına bağlanabilir. Bozulan kesme hattı takımının işe giriş açısı olan yanaşma açısının değişmesine ve keskinliğini kaybeden kesici kenarın malzeme ile temas alanının artması sonucu malzemeye plastik deformasyonla girişini yapabilmesi (dalması) için gerekli kuvvetin artmasına neden olmuştur. Şekil 7.14'de kesici ucun kesici kenar geometrisi görülmektedir.

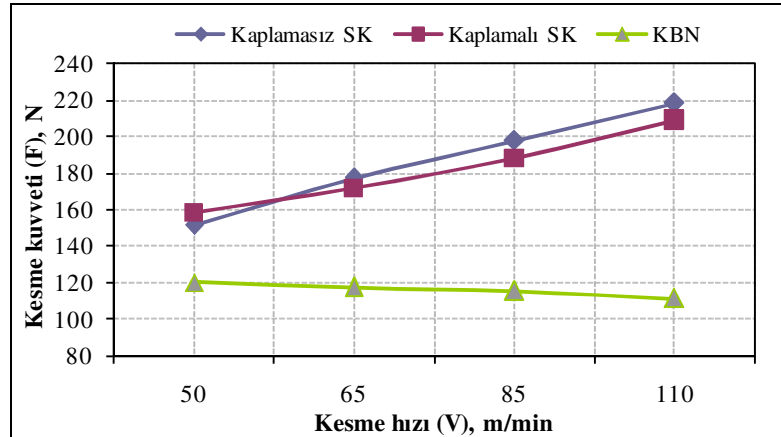


Şekil 7.14. Kesici ucun kesici kenar geometrisi

Kaplamasız SK kesicide Ff kuvvetinde kesme hızına bağlı olarak belirgin bir değişim görülmezken, kaplamalı SK kesicide ise 65 m/min kesme hızına kadar %18'lik bir artış gerçekleşmiştir. KBN kesicide ise artan kesme hızıyla birlikte kesme kuvveti bileşenlerinde paralel bir düşüş görülmüştür. En yüksek kuvvet olarak Fc teğetsel kuvvetin olduğu görülmüştür. Kesme kuvveti bileşenleri içerisinde en düşük Fc kuvvetine 70 N olarak 110 m/min kesme hızında (Şekil 7.13.c) KBN kesicide ulaşılmıştır.

%15 B₄C takviyeli kompozitin işlenmesinde kesme kuvveti ve bileşenlerinin değerlendirilmesi

%15 B₄C takviyeli kompozitin kesme parametrelerine bağlı olarak kesici takımlarla işlenmesi esnasında elde edilen kesme kuvvetleri Şekil 7.15'de sunulmuştur. Kesme kuvveti değerleri incelendiğinde, SK kesicilerde artan kesme hızıyla birlikte kesme kuvvetlerinde paralel bir artış görülmektedir. Şekil 7.15 incelendiğinde genel olarak kesme kuvvetinin değişimi açısından kaplamalı ve kaplamasız SK kesicilerin birbirine yakın değerlerde olduklarından ve artan kesme hızıyla birlikte paralel olarak ciddi bir artış gösterdiklerinden söz etmek mümkündür.

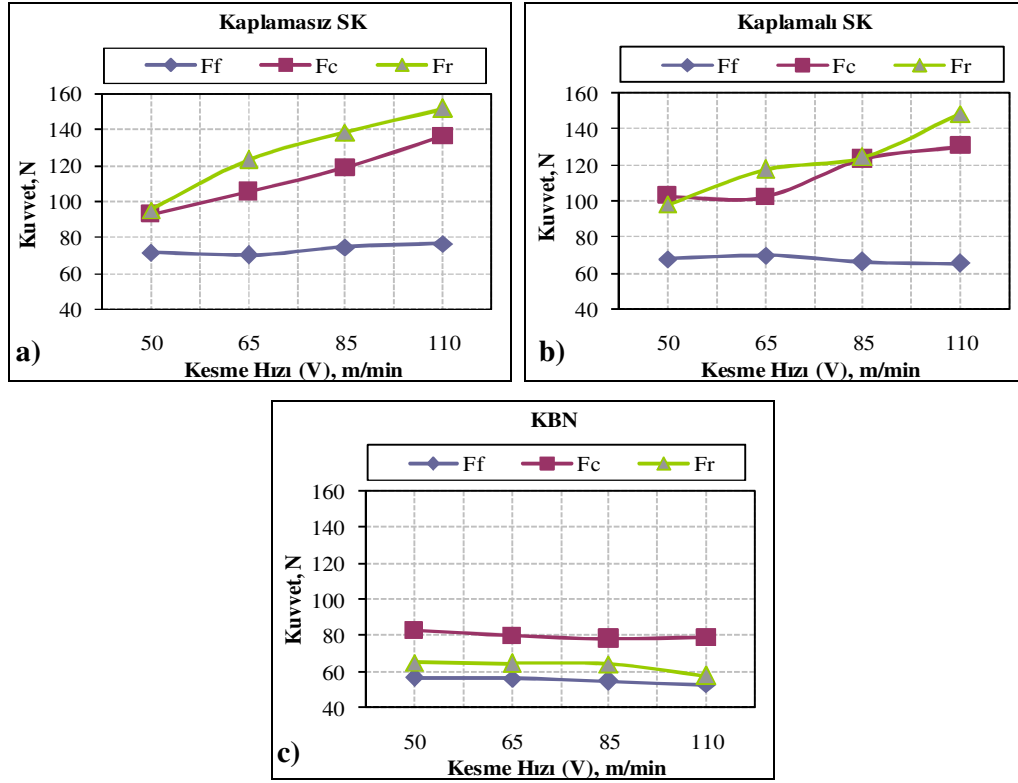


Şekil 7.15. %15 B₄C takviyeli kompozitin işlenmesinde değişen kesme hızlarında kesme kuvvetinin değişimi

Kompozit malzemeler içerdikleri B_4C takviye elemanı hacim oranına bağlı olarak işlenmeleri esnasında artan takviye elemanı oranı nedeniyle kesicinin daha fazla sert parçacığı kesme, yerinden çıkararak sökme veya kırmak zorunda kalması kesicinin abrasiv aşınmasına neden olmaktadır. Bu durumun aşağıdaki üç farklı durumdan kaynaklandığı düşünülmektedir. Bunlar;

- a) Matris malzemesinin yerine parçacıkların kesici uçla teması,
- b) Aşınma nedeniyle hasara uğramış kesme geometrisinin kesicinin kesme performansını düşürmesi,
- c) Takviye elemanlarının belirli bir hacim oranına kadar malzemenin plastik deformasyonla şekillendirmesini zorlaştıran özellikle elastik modül ve sertlik değeri gibi bazı mekanik özelliklerini iyi yönde geliştirmesi kesme kuvvetinin artmasına neden olmaktadır.

50 m/min kesme hızında kaplamalı takımda daha yüksek kesme kuvvet değeri görülürken 65 m/min'den sonra artan kesme hızlarıyla birlikte kaplamasız takımda kesme kuvvetlerinin en yüksek değerleri görülmüştür. Bu durum kaplamalı kesicinin yüksek kesme hızlarında kaplamasız kesicilere göre daha iyi performans sergilemesine bağlanmaktadır. En yüksek kesme kuvveti değeri, kaplamasız SK kesici takımla 110 m/min kesme hızı ile yapılan kesme işlemi sonucunda 217,78 N olarak ölçülmüştür. KBN kesici kesme hızındaki artışa paralel olarak kuvvetlerde düşüş görülmektedir. Bunun nedeni olarak KBN kesicilerin dayanımı ve yüksek kesme hızlarındaki performansına atfedilebilir [170]. En düşük kesme kuvveti ise KBN kesici takımla 110 m/min kesme hızında yapılan kesme işlemi sonucundan 111,34 N olarak ölçülmüştür. %15 B_4C takviyeli kompozitin işlenmesinde kesme hızına bağlı olarak ölçülen kesme kuvveti bileşenleri Şekil 7.16'de sunulmuştur. Kesme kuvveti bileşenleri değerlendirildiğinde (Şekil 7.16), SK kesicilerde artan kesme hızıyla birlikte F_c ve F_r kuvvetlerinin arttığı, F_f kuvvetinde belirgin bir değişim olmadığı (5 N), kaplamalı takımda artan kesme hızıyla birlikte kuvvetlerin bir miktar arttığı, kaplamalı SK için ise bir miktar düştüğü görülmektedir. Bunun nedeni olarak kaplamanın etkisi söylenebilir.

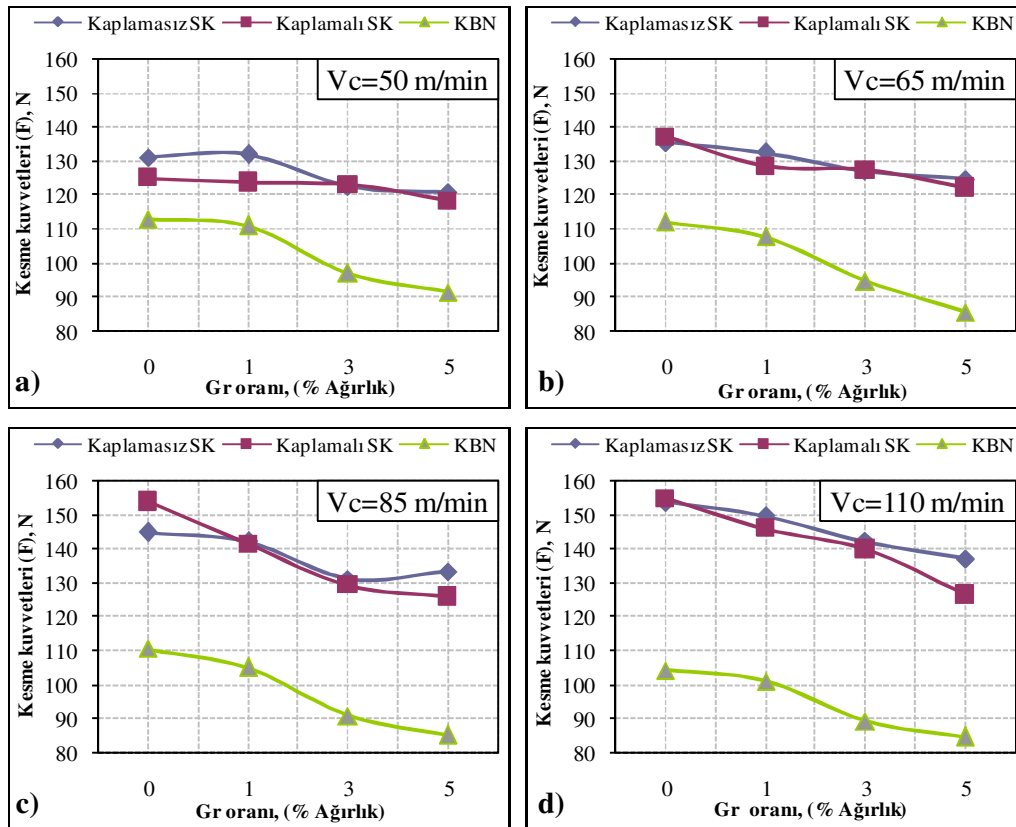


Şekil 7.16. %15 B₄C takviyeli kompozitin işlenmesinde kesme hızına bağlı olarak ölçülen kesme kuvveti bileşenleri
a) Kaplamasız SK, b) Kaplamalı SK, c) KBN kesici

%10 takviyeli kompozitte olduğu gibi artan kesme hızıyla birlikte SK kesicilerde radyal kuvvetin (Fr) en yüksek kesme kuvveti bileşeni olduğu görülmektedir. Şekil 7.16.a'da kaplamasız SK kesicide kesme hızına bağlı olarak Fr kuvvetinde % 37,2'lik bir artış görülmüştür. Şekil 7.16.b'de kaplamalı SK kesicide artan kesme hızıyla birlikte 65 m/min kesme hızına gelindiğinde kesici uçta bir aşınma gerçekleşmediği için Fc kuvvetinde bir düşüş gerçekleşmiş, fakat kesme hızı 85 m/min'e çıkartıldığında takım aşınmasından dolayı kuvvette artış gerçekleşmiştir. En yüksek kesme kuvveti bileşenine Fr=151,37 N olarak kaplamasız SK kesici takımında 110 m/min kesme hızında ulaşılmıştır. KBN kesicide artan kesme hızıyla birlikte kesme kuvvetlerinde Fc ve Fr için bir düşüş görülmektedir. En düşük kesme kuvveti bileşeni Ff=53,1 N olarak KBN kesicide 110 m/min kesme hızında tespit edilmiştir.

B₄C+Gr katkılı kompozitlerin işlenmesinde artan Gr miktarına bağlı olarak kesme kuvvetlerinin değerlendirilmesi

Sürtünme ve aşınma kesici takımın performansını sürekli olarak sınırlandırmakta, özellikle kuru işleme şartları kesici kenarın yüksek termal, mekanik ve kimyasal yüklere maruz kalmasına sebep olmaktadır [171]. Bu yüzden metal-metal temas yüzeyleri arasında katı yağlayıcı özelliği bilinen grafit, MMK malzemelerde de bu özelliğinden faydalanılarak kompozitin işlenebilirliğinin ve aşınma direnci ile sürtünme katsayısının iyileştirilmesinde dikkat çeken bir takviye elemanı olmuştur. Gerçekleştirilen çalışmada bu amaçla %10 B₄C parçacık takviyesine, %1, %3 ve %5 gibi değişen oranlarda üzeri nikel kaplı grafit parçacıklar ilave edilerek bor karbürün yanı sıra grafit içeren kompozit malzemeler üretilmiştir. MMK malzeme üretiminde Gr takviye elemanının tercih edilmesi ara yüzey bağının, Leon ve Drew'in yaptıkları çalışmaya benzer olarak NiAl₃ ve Ni₂Al₃ gibi intermetalik bileşikler şeklinde oluşacağı tahmin edilmektedir [172]. Bu kompozitlerin farklı kesme hızlarında elde edilmiş kesme kuvveti değerlerine ait grafikler Şekil 7.17'de sunulmuştur. Şekil 7.17 incelendiğinde tüm kesme hızlarında artan grafit miktarıyla birlikte bütün kesici takımlar için bileşke kesme kuvvetlerinde genel olarak bir düşüş görülmektedir. Kesme kuvvetlerindeki düşüşün nedeni olarak kompozitin yapısındaki Gr varlığıyla MMK'lerin mekanik özelliklerinin kötüleşmesi gösterilebilir. Ayrıca B₄C+Gr katkılı MMK'lerin kırık yüzey SEM incelemelerinde Gr parçacıklarının etrafından yayılan çatlaklar bu durumu desteklemektedir (Resim 7.16 – 7.17). Yapıda bulunan grafitin lamelli yapısının basıncın etkisiyle kolaylıkla deforme olması da kesme kuvvetlerinin düşüşü üzerinde önemli bir etkidir. Grafit'in varlığıyla kompozitin mekanik özelliklerinin kötüleşmesi, talaş kaldırma işlemi esnasında birinci deformasyon bölgesinde talaş oluşumu için gerekli olan kuvvetlerin düşmesine sebep olmuştur. Kuvvetlerdeki bu düşüşün grafitin katı yağlayıcı özelliğinden kaynaklanmadığı da kesici takım aşınması bölümünde detaylı bir şekilde açıklanmıştır (Bölüm 7.5.2). Kesme kuvvetleri açısından tüm kesme hızlarında SK kesici takımların birbirine yakın performans sergilediği ve KBN kesiciden ise yüksek değerde oluştukları görülmektedir.

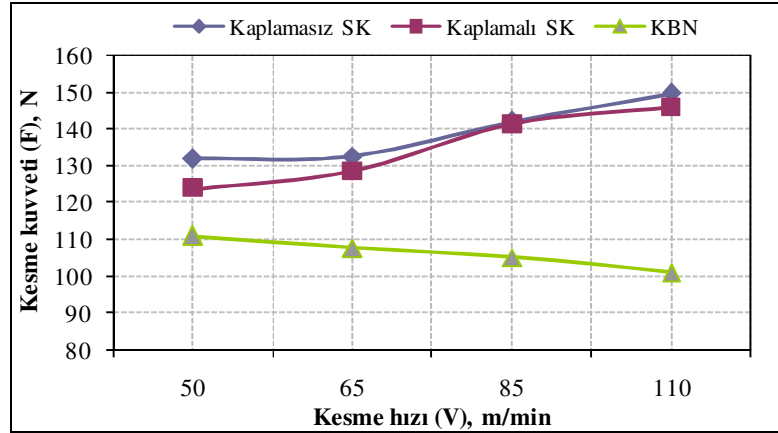


Şekil 7.17. %10 B₄C sabit parçacık oranı ve artan Gr miktarına bağlı olarak üretilen kompozitlerin işlenmesinde ölçülen kesme kuvvetleri
a) 50 m/min, b) 65 m/min, c) 85 m/min, d) 110 m/min kesme hızında

Grafit miktarındaki artışla birlikte kesme kuvvetlerinde kaplamasız SK kesicide %16, kaplamalı SK kesicide ise %18 KBN kesicide ise %9'luk düşüşler görülmüştür. Kesme hızındaki artışa bağlı olarak kompozitlerin işlenmesinde kesme kuvvetleri değerlendirildiğinde; B₄C parçacık takviyeli kompozitte olduğu gibi artan kesme hızının SK kesiciler için kuvvetleri arttırdığı görülmektedir. Bu durum artan kesme hızıyla birlikte SK kesicilerin hızlı bir şekilde aşınmaları ile açıklanabilir. Kesme kuvveti KBN kesici açısından değerlendirildiğinde ise KBN kesicide %1 Gr ilavesi sonrasında kesme kuvvetlerinde (%2,6) belirgin bir düşüş görülmezken, Gr ilavesinin %3 sonrasında kuvvetlerde %7,4'lük, %5 Gr ilavesi sonrasında ise kuvvetlerde %9'luk bir düşüş tespit edilmiştir. B₄C+Gr katkılı olarak üretilen MMK'lerin artan grafit miktarına bağlı olarak işlenebilirliklerinin daha detaylı incelenebilmesi için Şekil 7.18-7.23'te kesme kuvvetleri ve kuvvet bileşenleri grafiklerle sunulmuştur.

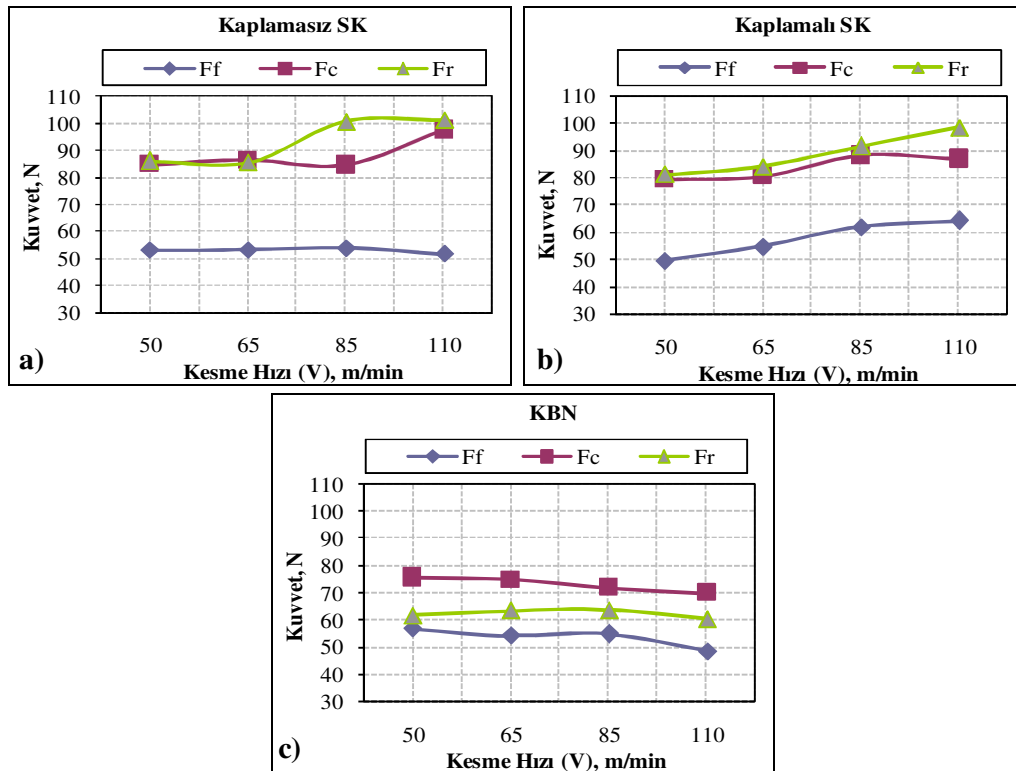
%1 Gr katkılı kompozitin işlenmesinde kesme kuvveti ve bileşenlerinin değerlendirilmesi

%1 Gr katkılı kompozitin kesme parametrelerine bağı olarak kesicilerle işlenmesi esnasında ölçülen kesme kuvvetleri Şekil 7.18’de sunulmuştur.



Şekil 7.18. %1 Gr katkılı kompozitin işlenmesinde değişen kesme hızlarında kesme kuvvetinin değişimi

B₄C+Gr katkılı MMK kesme kuvveti bakımından değerlendirildiğinde %1’lik Gr ilavesinin %10 B₄C takviyeli kompozite kıyasla kesme kuvvetleri üzerinde belirgin bir etkisi görülmemiştir. SK kesiciler kesme kuvvetleri bakımından birbirine yakın performans göstermişlerdir. Artan kesme hızıyla birlikte kesme kuvveti bakımından sırasıyla; kaplamalı SK kesicide %18,6’lık kaplamasız SK kesicide ise %13,7’lik bir artış görülmüştür. KBN kesicide Gr ilavesi sonrası artan kesme hızına paralel bir şekilde kesme kuvvetinde %9’luk bir düşüş gerçekleşmiştir. Tüm kesiciler içerisinde en yüksek kesme kuvvetine (149,78 N) kaplamasız SK kesicide 110 m/min kesme hızında, en düşük kesme kuvvetine (101,1 N) ise aynı kesme hızında KBN kesiciyle ulaşılmıştır. %1 Gr katkılı kompozitin işlenmesinde kesme kuvveti bileşenleri Şekil 7.19’da sunulmuştur.

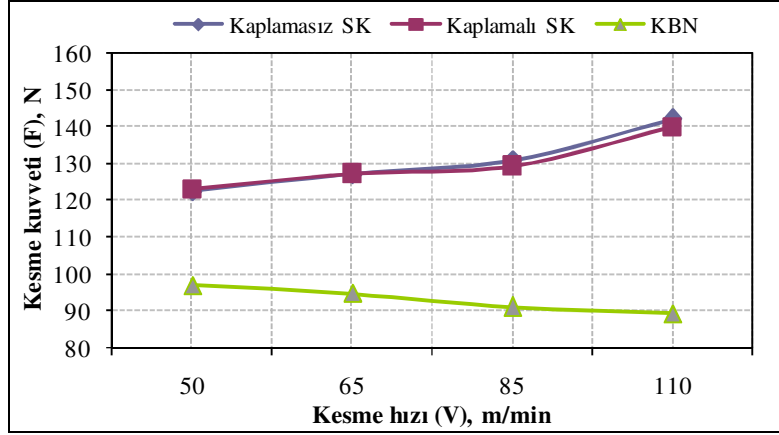


Şekil 7.19. %1 Gr katkıli kompozitin işlenmesinde kesme hızına bağlı olarak ölçülen kesme kuvveti bileşenleri
a) Kaplamasız SK, b) Kaplamalı SK, c) KBN kesici

Şekil 7.19 incelendiğinde SK kesiciler için genel olarak artan kesme hızıyla birlikte kesme kuvveti bileşenlerinin artışından söz etmek mümkündür. SK kesicilerde bu durum %10 B₄C takviyeli kompozitin işlenmesinde açıklanan kesici kenar hattının deforme olmasına bağlanabilir. KBN kesicide artan kesme hızıyla birlikte Fc ve Fr kuvvetinde bir değişim görülmezken, Ff kuvvetinde %29,7'lik belirgin bir düşüş tespit edilmiştir.

%3 Gr katkıli kompozitin işlenmesinde kesme kuvveti ve bileşenlerinin değerlendirilmesi

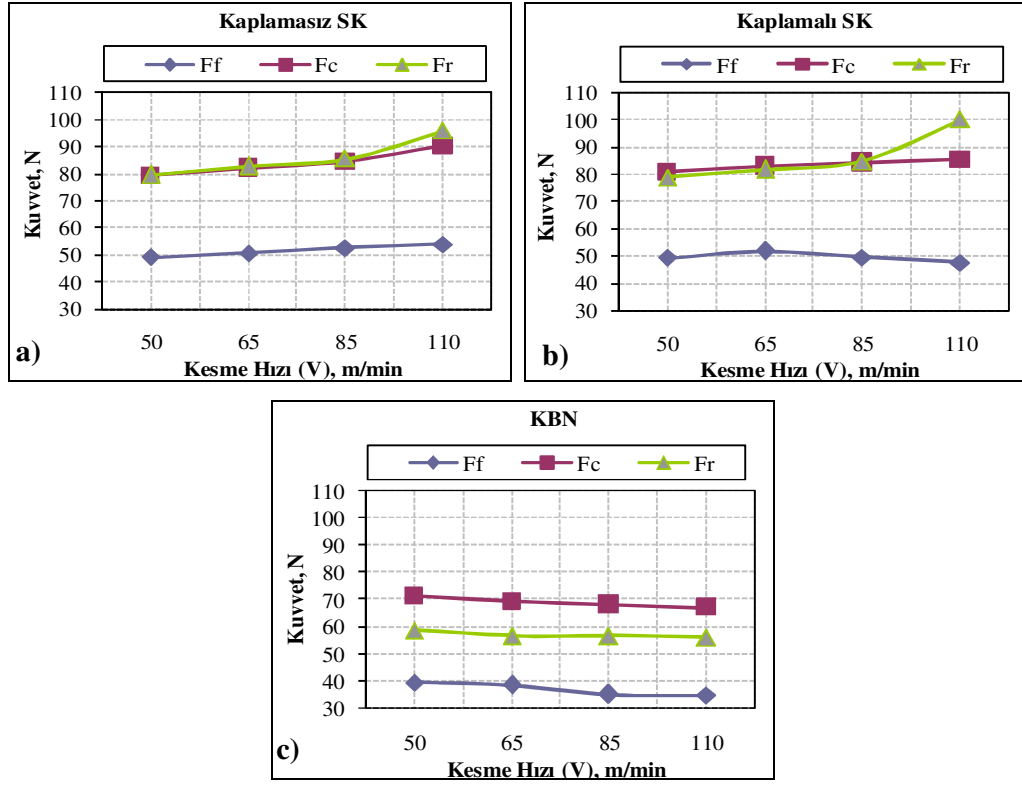
%3 Gr katkıli kompozitin kesme parametrelerine bağlı olarak kesici takımlarla işlenmesi esnasında ölçülen kesme kuvvetleri Şekil 7.20'de verilmiştir.



Şekil 7.20. %3 Gr katkılı kompozitin işlenmesinde değişen kesme hızlarında kesme kuvvetinin değişimi

Şekil 7.20’de kesme kuvvetleri değerlendirildiğinde, %1 Gr katkılı kompozitte olduğu gibi kesme kuvvetlerinde artan kesme hızıyla birlikte kaplamasız SK kesicide %13,8’lik, kaplamalı SK kesicide ise %12’lik artış görülmüştür. Genel olarak SK kesicilerde 85 m/min kesme hızına kadar kuvvetlerde %6,5’lik artış görülürken kesme hızının %30 arttırılmasıyla 110 m/min kesme hızında kuvvetlerde %16’lık bir artış görülmüştür. SK kesicilerde yüksek kesme hızlarında kesme kuvvetlerindeki belirgin bu artış, daha önceki bölümlerde açıklandığı gibi sert B_4C parçacıkların sebep olduğu hızlı takım aşınmasına bağlanmaktadır. KBN kesicide ise, diğer kompozit numunelerin işlenmesinde görülen bezer eğilim devam etmiş ve artan kesme hızıyla birlikte kuvvetler %7,8 oranında düşmüştür. %3 Gr katkılı kompozitin işlenmesinde elde edilen kesme kuvveti bileşenleri Şekil 7.21’de sunulmuştur.

Şekil 7.21 kesme kuvveti bileşenleri incelendiğinde, SK kesicilerde 85 m/min değerine kadar kuvvetlerde belirgin bir değişim görülmemektedir. Kaplamasız SK kesicide 85 m/min kesme hızından sonra Fr kuvvetinde %10,8’lik bir artış, Fc bileşeninde ise %6,4’lük bir artış meydana gelmiştir.

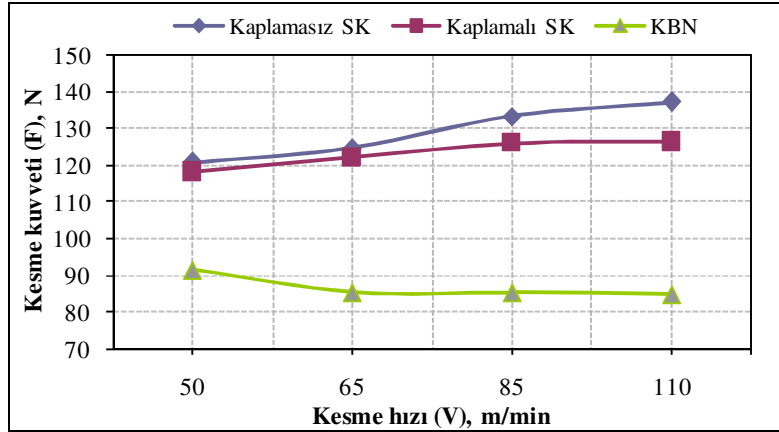


Şekil 7.21. %3 Gr katkıli kompozitin işlenmesinde kesme hızına bağı olarak ölçülen kesme kuvveti bileşenleri
a) Kaplamasız SK, b) Kaplamalı SK, c) KBN kesici

110 m/min kesme hızında SK kesicilerde radyal kuvvette görülen ani artışın nedeni olarak kesici uç geometrisinin bozulmasından söylenebilir (Resim 7.23.a). KBN kesicide artan kesme hızıyla birlikte kuvvet bileşenlerindeki genel düşüş eğilimi devam etmiştir.

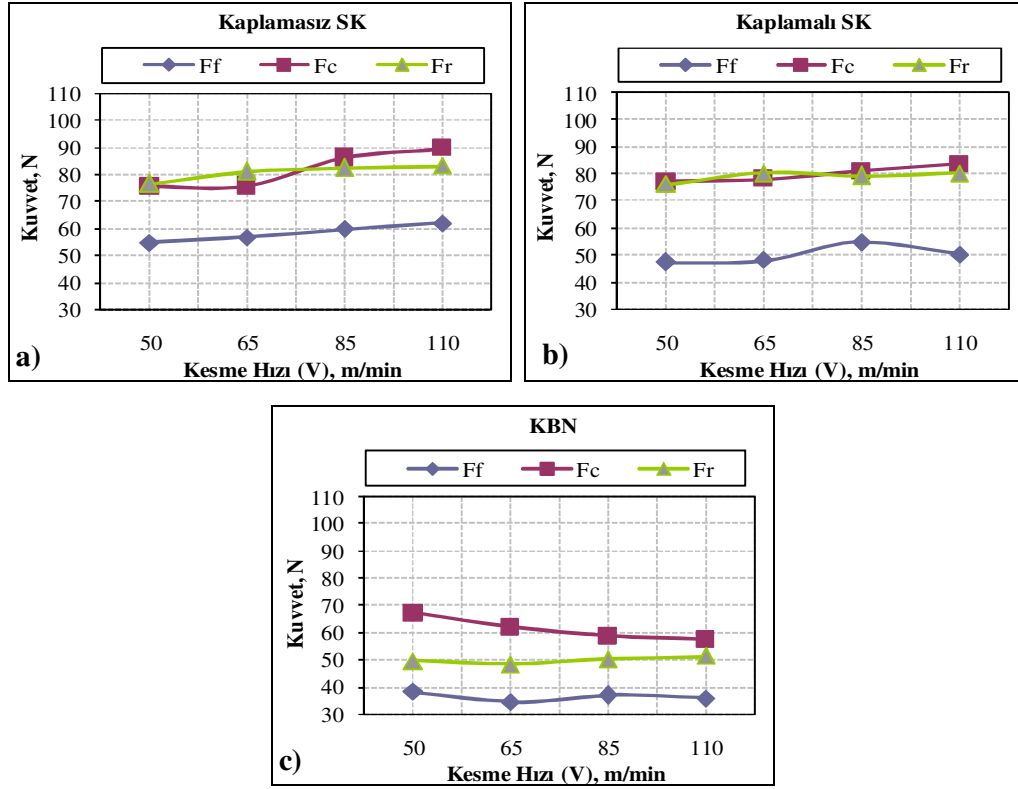
%5 Gr katkıli numunenin işlenmesinde kesme kuvveti ve bileşenlerinin değerlendirilmesi

%5 Gr katkıli kompozitin kesme parametrelerine bağı olarak kesici takımlarla işlenmesi esnasında ölçülen kesme kuvvetleri Şekil 7.22'de sunulmuştur.



Şekil 7.22. %5 Gr katkıli kompozitin işlenmesinde değişen kesme hızlarında kesme kuvvetinin değişimi

%5 Gr katkıli kompozit artan kesme hızına bağlı olarak işlenmesinde 65 m/min kesme hızına kadar SK kesicilerde paralel bir artış görülmüştür (Şekil 7.22). Bu kesme hızından sonra kaplamalı SK kesicide 85 m/min kesme hızı değerine kadar kuvvetlerde %3,6'lık artış görülürken, kesme hızının %30 arttırılmasıyla 110 m/min'e kadar kuvvetlerde bir değişim yaşanmamıştır. Kaplamasız SK kesicide artan kesme hızıyla birlikte kesme kuvvetlerindeki artış devam etmiştir. KBN kesicide 65 m/min kesme hızına gelindiğinde %7,12'lik bir düşüş gerçekleşmiş ve devamında artan kesme hızıyla birlikte kuvvetlerde belirgin bir değişim gerçekleşmemiştir (1~2 N). %5 Gr katkıli kompozitin işlenmesi esnasında ölçülen kesme kuvveti bileşenleri Şekil 7.23'de verilmiştir. Şekil 7.23 kesme kuvveti bileşenleri incelendiğinde genel olarak kaplamalı ve kaplamasız SK kesiciler için artan kesme hızına bağlı olarak tüm kuvvet bileşenlerinde bir artış söz konusudur. SK kesicilerde en yüksek kesme kuvveti bileşeninin teğetsel kuvvet (F_c) olduğu görülmektedir. %10 B4C takviyeli kompozit ile karşılaştırıldığında radyal kuvvetin yerine teğetsel kuvvetin en yüksek kuvvet olması artan Gr varlığıyla takım aşınmasının azalması ve kesici kenar geometrisinin korunması olarak söylenebilir.



Şekil 7.23. %5 Gr katkıli kompozitin işlenmesinde kesme hızına bağlı olarak ölçülen kesme kuvveti bileşenleri
a)Kaplamasız SK, b) Kaplmalı SK, c) KBN kesici

KBN kesicide ise artan kesme hızıyla birlikte radyal ve aksenal kuvvette bir değişim görülmezken düşük kesme hızlarında teğetsel kuvvet yüksek olduğu ve artan kesme hızıyla birlikte azaldığı görülmektedir. Bu durum artan kesme hızıyla birlikte YT oluşumun azalmasına bağlanabilir.

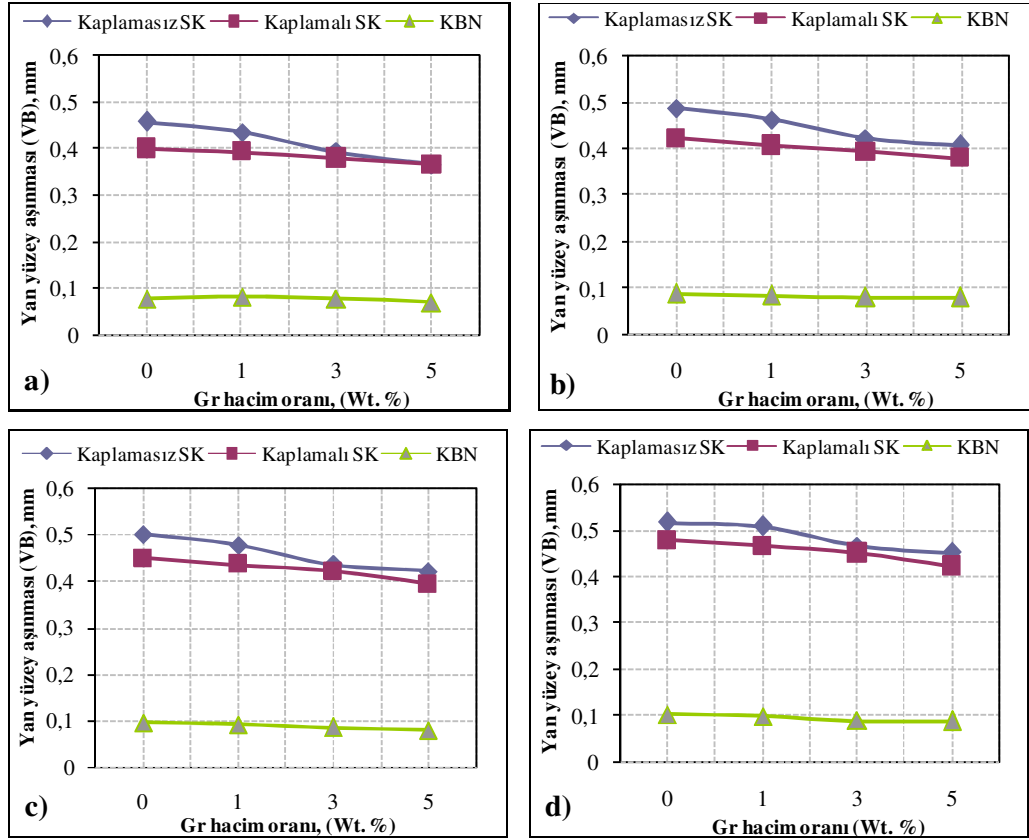
7.7.2. Kesici takım aşınması

Üretimi gerçekleştirilen numuneler içerisinde takım aşınması deneyleri yalnızca grafit katkıli kompozitlerde gerçekleştirilmiştir. B_4C+Gr katkıli kompozit numunelerde artan grafit miktarının takım aşınması üzerindeki etkileri, kesme hızına bağlı olarak incelenmiştir. Aşınma deneyleri, ilerleme (0,11 mm/rev) ve kesme derinliği (0,5 mm) sabit tutularak kuru kesme şartları altında gerçekleştirilmiştir. Deneylerde, SK kesici takımlar için 360 mm^3 , KBN esaslı kesici takım için ise 4200

mm³ olmak üzere talaş hacmi sabit tutulmuştur. Takımlarda oluşan aşınma miktarları dijital mikroskop yardımıyla ölçülmüştür. SK kesici takımlarda etkin olmakla birlikte tüm kesici takımlarda abrasiv aşınma mekanizmasına bağlı olarak, serbest yüzey aşınması tespit edilmiştir. Takımların çoğunda talaş yüzeyi ve esas kesme kenarı yan yüzeylerinde matris malzemesi yapışması gözlenmiştir. Kesici takım aşınma miktarları oluşturulan grafikler, aşınma türleri ve etkileri ise farklı ölçeklerde SEM ile çekilmiş üç boyutlu takım fotoğraflarının yardımıyla değerlendirilmiştir.

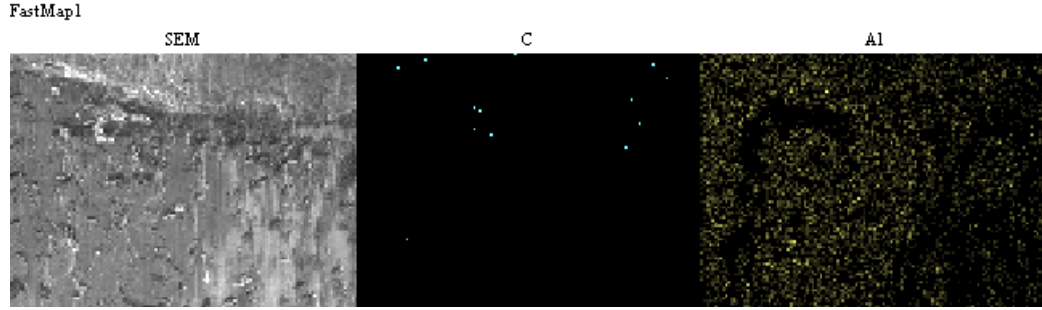
B₄C+Gr katkılı kompozitlerin işlenmesinde artan Gr miktarına bağlı olarak takım aşınmasının değerlendirilmesi

B₄C+Gr katkılı kompozitlerin SK ve KBN kesicilerle farklı talaş hacimlerinde işlenmesi sonrasında artan grafit miktarına bağlı olarak tüm kesici takımlar için aşınma grafikleri Şekil 7.24'de sunulmuştur. Şekil 7.24 incelendiğinde grafit miktarındaki artışa bağlı olarak tüm kesicilerde yan yüzey aşınmasının azaldığı görülmektedir. Genel olarak %1 Gr ilavesinin takım aşınması üzerinde belirgin bir etkisi (Şekil 7.24.a) olmamıştır. SK kesiciler için %3 Gr ilavesi kritik bir değer olarak görülmektedir. Tüm kesme hızlarında %3 Gr ilavesinde genel olarak kaplamasız ve kaplamalı kesiciler hemen hemen aynı aşınma değerine ulaşmıştır. Takımlar açısından aşınma sonuçları değerlendirildiğinde ise, SK kesicilerin birbirine yakın (0,3~0,6 mm) değerlerde olduğu KBN kesicide ise 0,1 mm'nin altında gerçekleştiği görülmektedir. Kaplamalı SK kesicinin kaplamasız takıma kıyasla %14'e varan oranlarda daha az aşındığı tespit edilmiştir. Bu durum TiN kaplamanın aşınma direncinin daha yüksek olması ve sürtünme katsayısının düşük olması nedeniyle talaş yapışmasından daha az etkilenecek daha geç aşınmasına bağlanabilir. KBN kesici daha fazla talaş hacminde işlenmesine rağmen sertliğinin yüksek olmasından dolayı SK kesiciler karşısında belirgin bir fark ortaya koymuştur. Artan kesme hızına bağlı olarak kesiciler değerlendirildiğinde ise, SK takımlar için aşınma miktarı artmıştır. En yüksek aşınma değerlerine kaplamasız SK kesici ile en yüksek kesme hızında (110 m/min) ulaşılmıştır.



Şekil 7.24. Artan % Gr miktarına bağlı olarak, yan yüzey aşınma grafikleri
a) 50 m/min, b) 65 m/min, c) 85 m/min, d) 110 m/min kesme hızında

Takım aşınması deneyi sonrasında kesme işlemi esnasında katı yağlayıcı gibi hareket edebilen grafitlerin varlığıyla, takım talaş yüzeyi-talaş ve takım serbest yüzeyi-iş parçası malzemesi sürtünme katsayısının düşmesi üzerindeki etkisi [30], ayrıca kesici takımın yüzeyini kaplayarak takımın serbest yüzey ve talaş yüzeyi üzerinde partiküllerin birikimini engelleyen yağlayıcı bir etkinin varlığı incelenmiştir [173]. Bu amaçla en yüksek (%5) grafit katkıli kompozitin işlenmesinde kesici takımın talaş yüzeyi ve serbest kesici kenarında karbon ve alüminyumun varlığı araştırılmıştır. %5 Gr katkıli numunenin 110 m/min kesme hızında kaplamalı SK kesiciyle işlenmesi sonrasında SEM incelemeleriyle yapılan Map analizi sonuçları Resim 7.19'da görülmektedir.

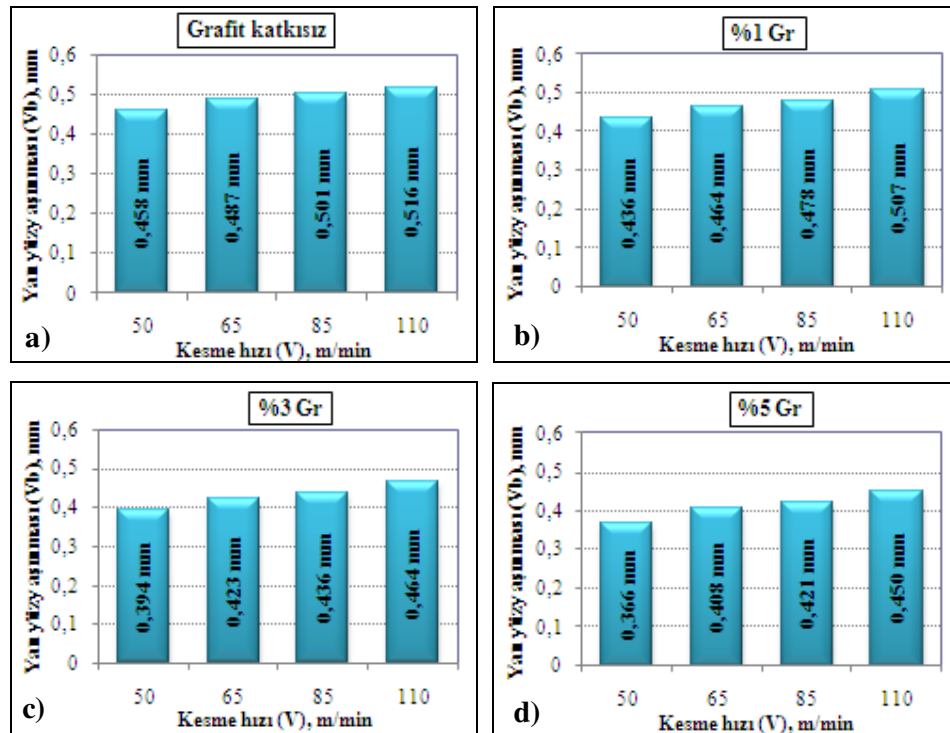


Resim 7.19. Kaplamalı SK kesicinin talaş yüzeyi ve serbest yan yüzeyinin Map analizi sonuçları

Resim 7.19 Map analizi sonuçları incelendiğinde kesici kenar serbest yüzeyi ve talaş yüzeyinde karbonun belirgin oranda varlığından söz etmek mümkün değildir. Kesicinin yoğun olarak Al tarafından sarıldığı görülmektedir. MMK numunenin yapısındaki grafit tam olarak yağlayıcı özeliğini gösteremediği söylenebilir. Artan Gr miktarına bağlı olarak takım aşınmasındaki azalma ise, yapıdaki grafitin kompozitin mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkilemesine, kısmı olarakta grafitin yağlayıcı etkisine bağlanmıştır (Şekil 7.6).

Kaplamasız sementit karbür kesici takımlar

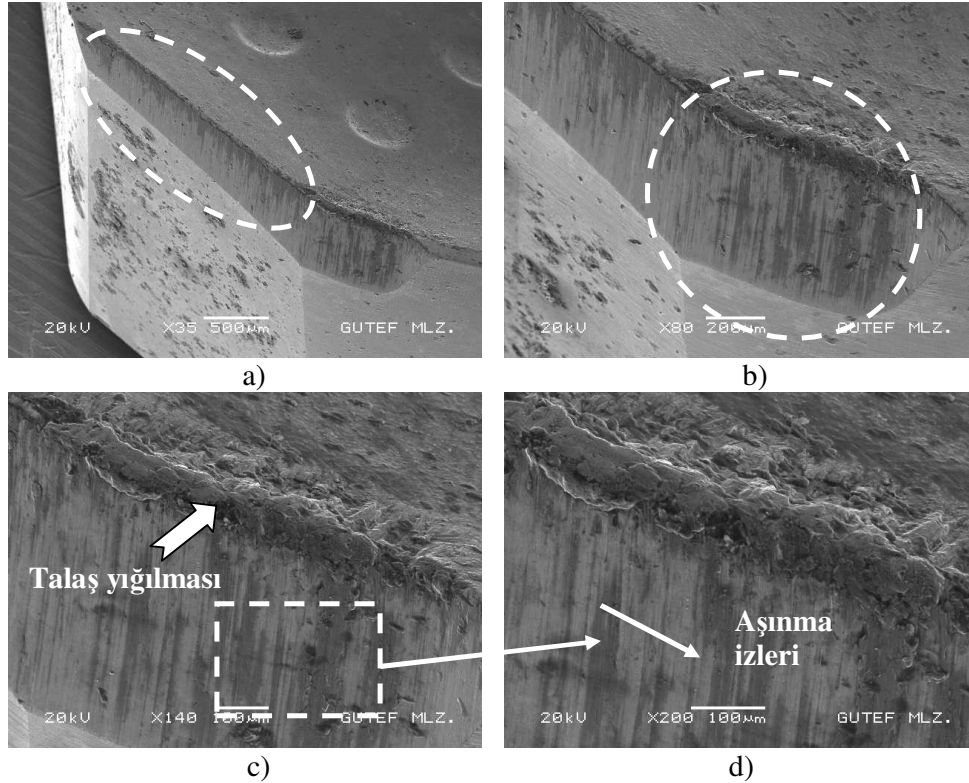
Kaplamasız SK kesici ile sabit kesme derinliği ve ilerlemede, dört farklı kesme hızı ve dört farklı numune ile toplam 16 deney gerçekleştirilmiştir. Grafit miktarındaki artışa bağlı olarak takım aşınması deneyleri sabit talaş hacminde (360 mm^3) gerçekleştirilmiştir. Kesme hızındaki artışa bağlı olarak elde edilen aşınma değerleri Şekil 7.25’de sunulmuştur. Şekil 7.25’de SK kesici takımın esas kesme kenarı yan yüzeyinde aşınmanın, kesme hızıyla paralel bir şekilde arttığı görülmektedir. Yan yüzey aşınması MMK’lerin yapısındaki B4C parçacıklarının sebep olduğu abrasiv aşınma mekanizmasıyla gerçekleşmektedir. Kaplamasız SK kesici ile numunelerin işlenmesinde 50 m/min’den kesme hızının % 120’lik artış sonrasında 110 m/min’de artan Gr miktarıyla birlikte aşınma değerlerinde %14,8’lik düşüş görülmüştür.



Şekil 7.25. MMK'lerin kaplamasız SK takım ile işlenmesinde kesici takım esas kesme kenarı yan yüzeyinde oluşan aşınma değerleri
a) Gr katkısız, b) %1 Gr, c) %3 Gr, d) %5 Gr katkılı MMK

MMK numunelerin kaplamasız SK kesici takım ile işlenmesi sonrasında SEM görüntüleri

Kaplamasız SK kesicide oluşan aşınma tipi ve mekanizmalarının detaylı bir şekilde incelenebilmesi için (%10 B₄C) ve (%10 B₄C + %5 Gr) takviyeli kompozitlerin SEM görüntüleri ayrı ayrı değerlendirilmiştir. Ayrıca kesme hızının takım aşınması üzerindeki etkisinin ortaya konulabilmesi için düşük (50 m/min) ve yüksek (110 m/min) kesme hızlarındaki aşınmalar SEM görüntüleriyle (Resim 7.20) detaylı bir şekilde incelenmiştir.

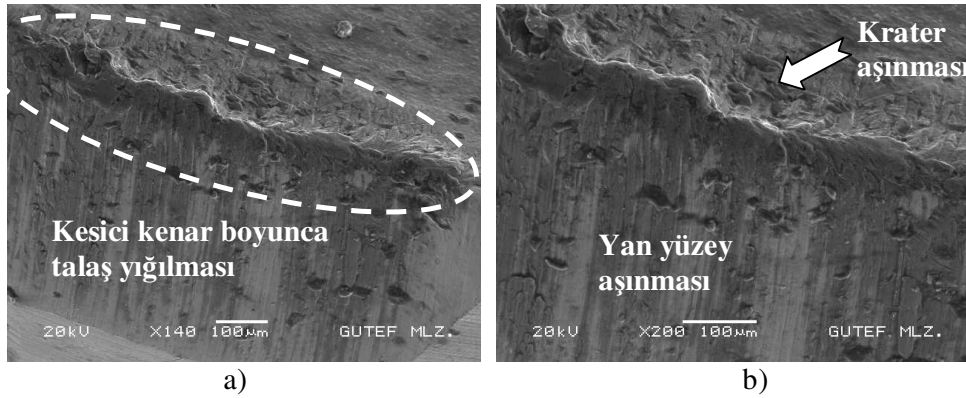


Resim 7.20. %10 B₄C takviyeli kompozitin kaplamasız SK kesici takım ile 50 m/min kesme hızında işlenmesi sonrasında çekilen SEM fotoğrafları a)x35, b) x80, c) x140, d) x200 büyütme

Resim 7.20 incelendiğinde kaplamasız takımın esas kesme hattı (Resim 7.20.a) ve yardımcı kesme hattı boyunca (Resim 7.20.b) düzenli bir aşınmanın gerçekleştiği görülmektedir. Kesici takım talaş yüzeyinde kesme kenarı (Resim 7.20.c) boyunca yapışan kompozit malzemesinin yığılması söz konusudur. Takımın kesme kenarı üzerinde malzemenin katmanlar halinde yapışarak tabaka oluştuğu ve böylelikle yapışan tabakanın kalınlığının arttığı tespit edilmiştir. Ayrıca B₄C parçacıkların kesici uç serbest yüzeyi üzerindeki (Resim 7.20.d) abrasiv etkileri ve abrasiv aşınma izleri görülmektedir.

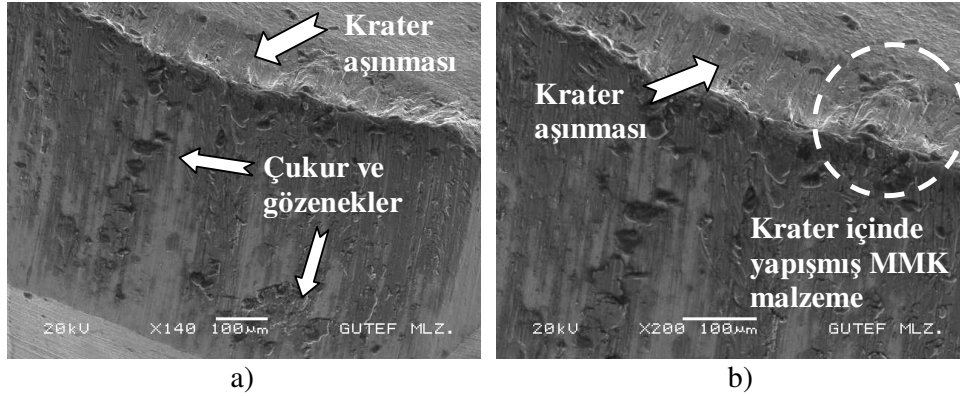
%10 B₄C parçacık takviyeli kompozitin 110 m/min kesme hızında işlenmesi sonrasında elde edilen resimler (Resim 7.21) incelendiğinde 50 m/min kesme hızında görülen aşınmaya benzer düzenli bir yanak aşınmasından söz edilebilir. Yapışan kompozit malzemesinin kesme hattının bitiminde blok halinde oluştuğu (Resim 7.21.a) ve kesici kenar geometrisini değiştirdiği görülmektedir. Matris malzemesi

birikiminin kesici takımın bir parçası gibi davranarak birince deformasyon bölgesinde kayma düzleminin açısını azalttığı, takım-talaş temas uzunluğunu arttırdığı ve böylelikle kesme kuvvetlerinin artışına sebep olduğu düşünülmektedir. Kesici uç serbest yüzeyi boyunca matris ve takviye elemanlarının (Resim 7.21.b) yapıştığı ve kopma eğiliminde oldukları da tespit edilmiştir. Talaş yüzeyinde de belirgin miktarda krater aşınması görülmektedir.



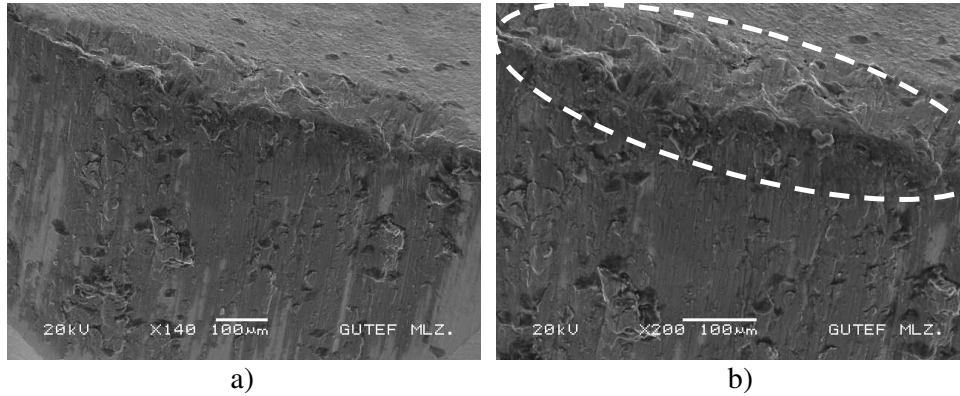
Resim 7.21. %10 B₄C takviyeli kompozitin kaplamasız SK kesici takımla 110 m/min kesme hızında işlenmesi sonrasında çekilen SEM fotoğrafları
a)x140 büyütme, b) x200 büyütme

%5 Gr katkıli kompozitin 50 m/min kesme hızında kaplamasız SK kesiciyle işlenmesinde düzenli bir aşınmadan söz edilebilir. Bu kesme hızında B₄C takviyeli kompozitin işlenmesi ile kıyaslandığında ise kesme hattı boyunca ciddi bir yapışma ile (Resim 7.22.a) karşılaşılmamaktadır. Bunun nedeni olarak yapıdaki Gr varlığıyla MMK'in takıma yapışma eğilimi azalmıştır denebilir. Fakat kesici takım serbest yan yüzeyinde daha etkin katmanlar görülmektedir. Ayrıca kesici takımının üretiminden kaynaklandığı düşünülen gözenek ve çukurlarda görülmektedir. Takım talaş yüzeyinde ise kesici kenara çok yakın ve dar krater oluşumu mevcuttur. Kesici takım esas kesme geometrisinin bozulmasıyla birlikte krater içine yapışmış MMK malzeme (Resim 7.22.b) görülmektedir.



Resim 7.22. %5 Gr katkıli kompozitin kaplamasız SK kesici takımla 50 m/min kesme hızında işlenmesi sonrasında çekilen SEM fotoğrafları a) x140, b) x200 büyütme

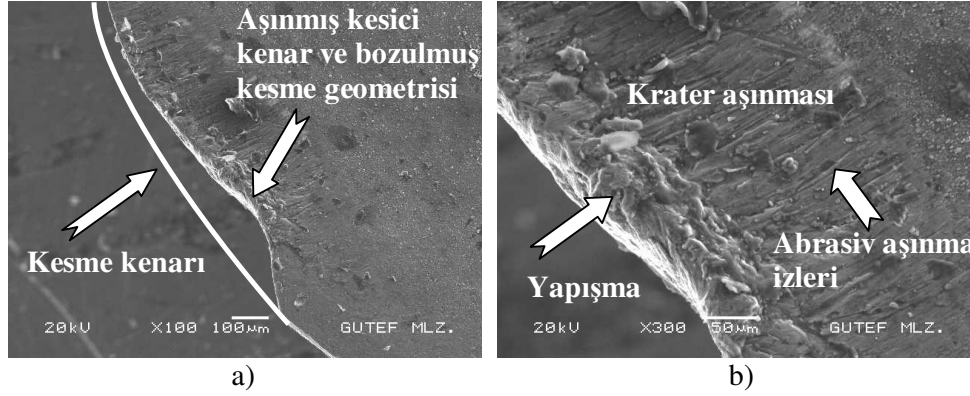
%5 Gr katkıli kompozitin 110 m/min kesme hızında kaplamasız SK kesici takımla işlenmesinde artan kesme hızıyla yapışmanın daha yoğun bir şekilde krater çukurunu doldurduğu görülmektedir (Resim 7.23.a). Etkin kesme kenarı boyunca belirgin malzeme birikiminden söz etmek mümkün değildir (Resim 7.23.b).



Resim 7.23. %5 Gr katkıli kompozitin kaplamasız SK kesici takımla 110 m/min kesme hızında işlenmesi sonrasında çekilen SEM fotoğrafları a) x140, b) x200 büyütme

SK kesicilerde, MMK'lerin yapısındaki sert B_4C parçacıklarının takım talaş yüzeyinde taşlama işlemine benzer bir etki yapmaları sonucunda takım talaş yüzeyinde krater aşınması ile karşılaşılmıştır. SK kesici takımlarda serbest yüzey aşınması ve krater aşınması birlikte oluşmuş fakat aşırı meydana gelen serbest yüzey aşınması kesme kenarının geometrisini bozmuştur (Resim 7.24.a). Kesici takımın

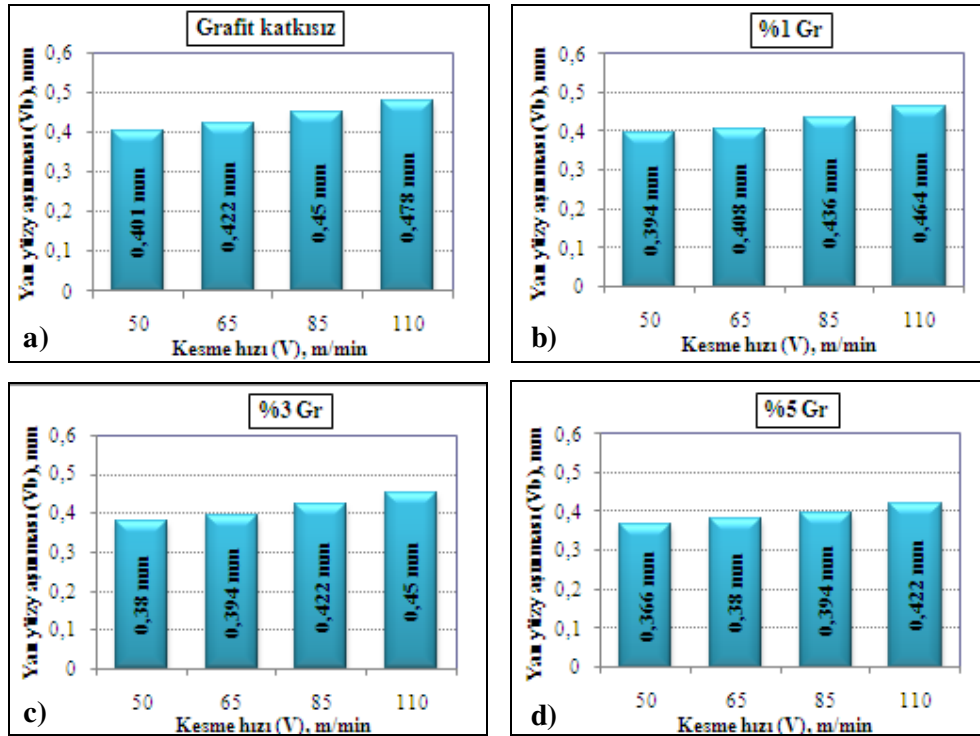
krater yüzeyinde B_4C parçacıklarının oluşturduğu abrasiv aşınma izleri Resim 7.24.b’de görülmektedir.



Resim 7.24. %10 B_4C takviyeli kompozitin kaplamalı SK kesici takımıyla 50 m/min kesme hızında işlenmesi sonrasında çekilen SEM fotoğrafları a) x100, b) x300 büyütme

Kaplamalı sementit karbür kesici takımlar

Artan Gr miktarına bağlı olarak kesme hızındaki artışla birlikte kaplamalı SK kesicinin esas kesme kenarında ölçülen aşınma miktarları Şekil 7.26’da verilmiştir. Artan Gr miktarıyla birlikte takım ömründe yaklaşık olarak %14’lük bir iyileşme görülmüştür. Şekil 7.26’da kaplamalı kesici takımıyla MMK’lerin işlenmesinde elde edilen aşınma değerleri incelendiğinde kesme hızındaki artışa bağlı olarak kaplamasız takımda olduğu gibi aşınma miktarı artmıştır. Kaplamasız takım ile kıyaslandığında ise aşınma miktarlarında daha az bir değerde ölçülmüştür. Bunun nedeni olarak takım üzerinde uygulanan kaplamanın takımın aşınma direnci üzerinde yaptığı olumlu etki gösterilebilir.

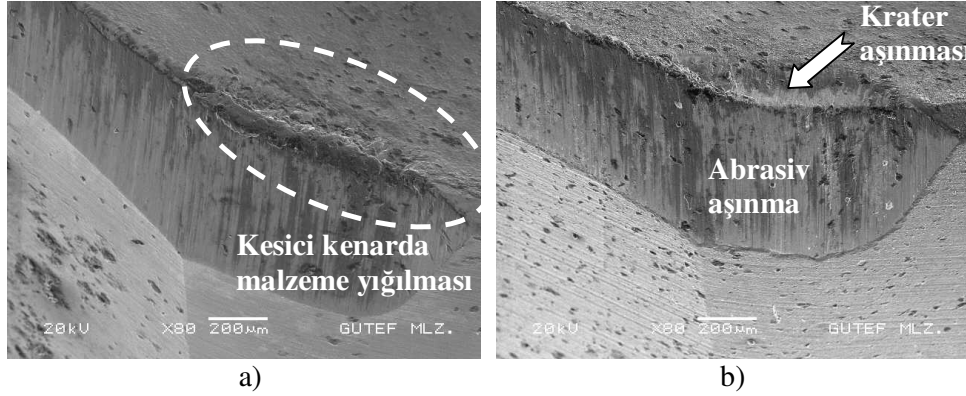


Şekil 7.26. MMK'lerin kaplamalı SK takım ile işlenmesinde kesici takım esas kesme kenarı yan yüzeyinde oluşan aşınma değerleri
a) Gr katkısız, b) %1 Gr, c) %3 Gr, d) %5 Gr katkılı MMK

MMK numunelerinin kaplamalı SK kesici takım ile işlenmesi sonrasında SEM görüntüleri

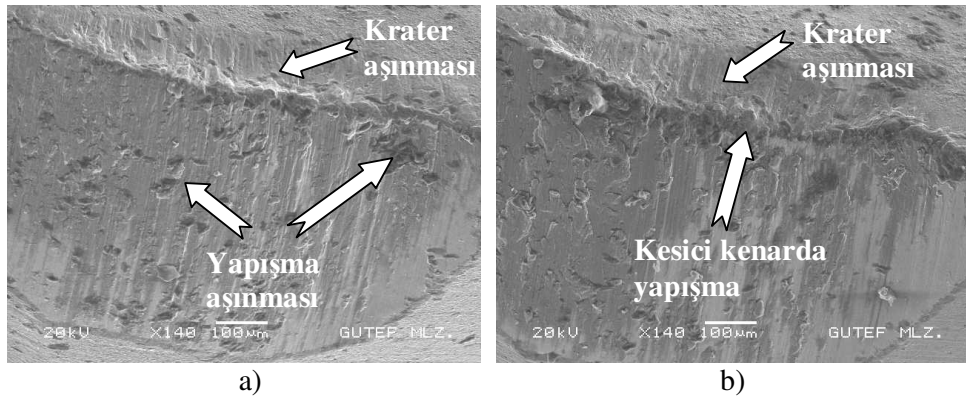
Kaplamalı SK kesicide kesme parametrelerinin takım aşınması üzerindeki etkileri artan kesme hızına bağlı olarak incelenmiştir. Kaplamalı takım ile %10 B₄C takviyeli kompozitin işlenmesinde elde edilen SEM fotoğrafları Resim 7.25 incelendiğinde kaplamasız SK takıma benzer sert parçacıkların neden olduğu abrasiv ve matris malzemenin doğasından kaynaklanan adhesiv aşınmalar görülmektedir. 50 m/min kesme hızında esas kesme kenarı üzerinde matris malzemesi birikiminin katmanlar halinde oluştuğu görülürken (Resim 7.25.a), artan kesme hızıyla birlikte esas kesme kenarı üzerinde yapışma azalmıştır. Kesme hızının artmasıyla iş parçası malzemesinin kesici takım serbest yüzeyine yapışma eğilimini azalttığı [174,175] bilinmektedir. Bundan dolayı artan kesme hızıyla birlikte yapışma azalmış fakat

takım aşınması artmıştır. Takım talaş yüzeyinde krater aşınmasının arttığı, kesici kenar geometrisinin bozulduğu ve ucun zayıfladığı görülmüştür (Resim 7.25.b).



Resim 7.25. %10 B₄C takviyeli kompozitin kaplamalı kesici takım ile işlenmesi sonrasında çekilen kesici takım SEM fotoğrafları
a) Kesme hızı 50 m/min, b) Kesme hızı 110 m/min

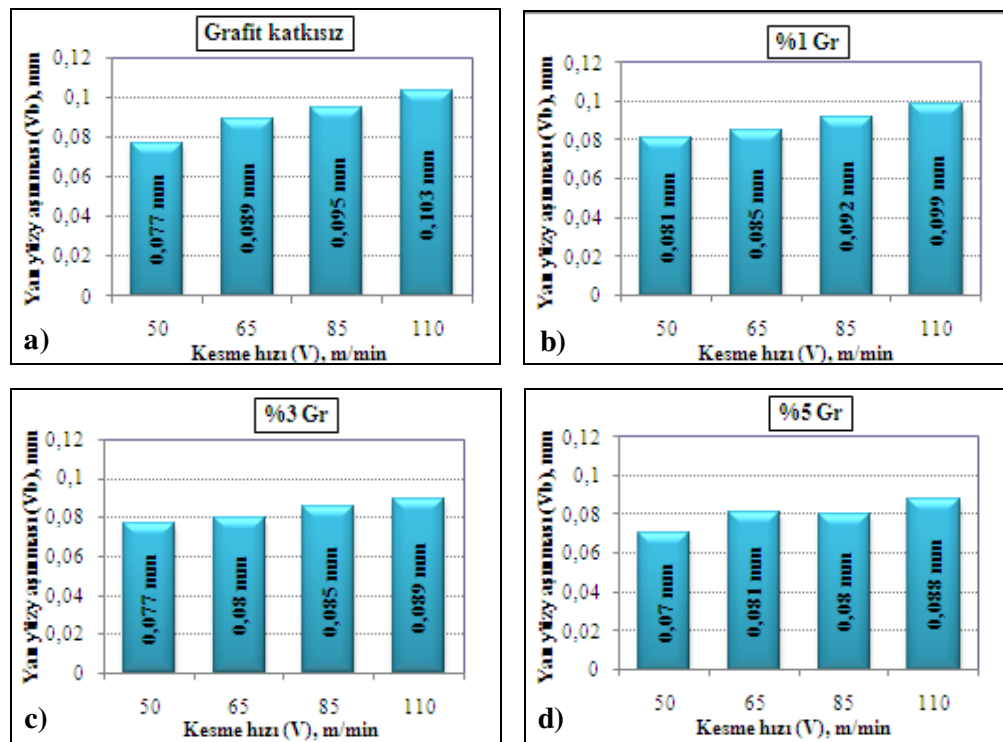
B₄C+Gr katkıli kompozitin kaplamalı SK kesici takım ile işlenmesi sonrasında çekilen SEM fotoğrafları incelendiğinde krater aşınmasının meydana geldiği görülmektedir (Resim 7.26.a). Kesme hızının artması ile kesme hattı boyunca matris malzemesinin azaldığı tespit edilmiştir. Artan kesme hızıyla esas kesme kenarı geometrisinin bozulduğu görülmektedir (Resim 7.26.b). Bu durumun kesme kuvvetleri üzerinde artışa sebep olacağı düşünülmektedir.



Resim 7.26. %5 Gr katkıli kompozitin kaplamalı kesici takım ile işlenmesi sonrasında çekilen kesici takım SEM fotoğrafları
a) Kesme hızı 50 m/min, b) Kesme hızı 110 m/min

Kübik bor nitür kesici takımlar

Aşınma deneylerinde KBN kesicinin daha sert olmasından dolayı, SK kesicilerle kaldırılan talaş hacmi yetersiz kalmış ve takım aşınması görülememiştir. Deneyler 4200 mm³ talaş hacmine kadar devam ettirilmiş ve takım esas kesme kenarında ölçülen aşınma miktarları Şekil 7.27’de verilmiştir. Kesici takım serbest yüzey aşınma miktarının 0,1 mm düşük olduğu, SK kesicilere nazaran daha az aşındığı belirlenmiştir. KBN kesicilerde yığıntı talaş oluşumuna rastlanmamıştır.



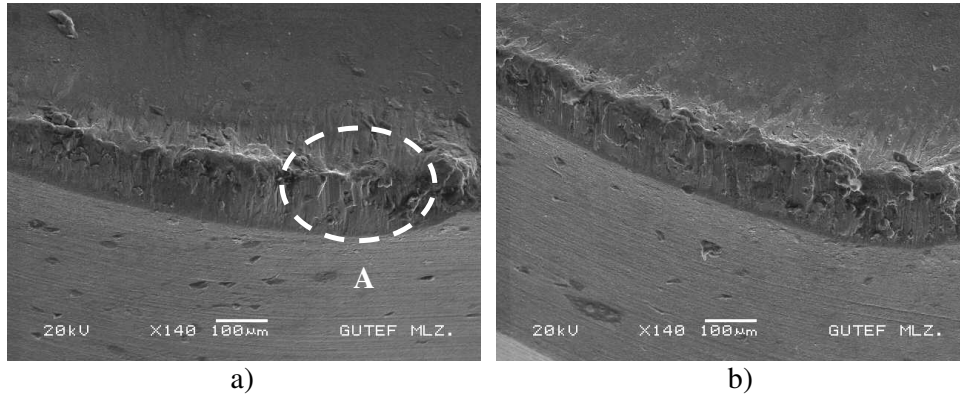
Şekil 7.27. MMK'lerin KBN kesici takımla işlenmesinde kesici takım esas kesme kenarı yan yüzeyinde oluşan aşınma değerleri

a) Gr katkısız, b) %1 Gr, c) %3 Gr, d) %5 Gr katkılı MMK

Genel olarak MMK'in işlenmesinde elde edilen aşınma değerleri incelendiğinde, kesme hızındaki artışa bağlı olarak KBN kesicide, SK takımlarda olduğu gibi artmıştır (Şekil 7.27). Artan Gr miktarına bağlı olarak aşınma miktarları değerlendirildiğinde; %5 Gr ilavesinin %10 B₄C takviyeli numunenin işlenmesine oranla takım aşınması üzerinde %11'lik bir iyileşme sağladığı görülmüştür.

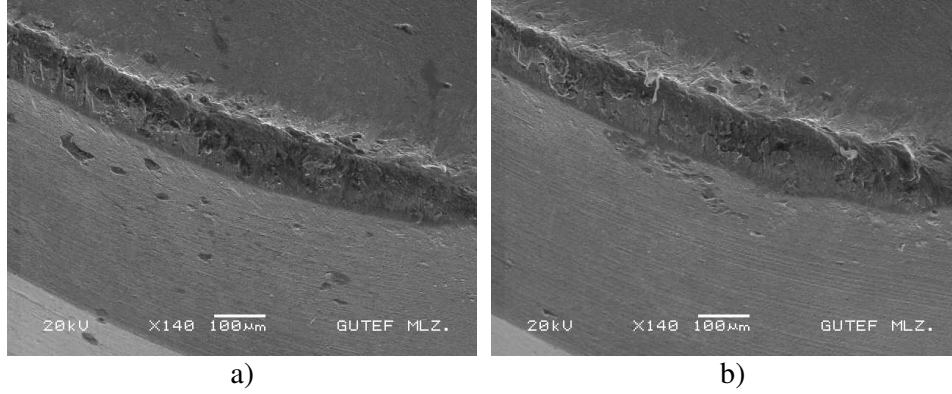
MMK numunelerin KBN kesici takımla işlenmesi sonrasında SEM görüntüleri

Resim 7.27 incelendiğinde kesici talaş yüzeyinde az olmakla birlikte kesme hattı boyunca kompozit malzemesinin yapışması görülmektedir. Özellikle düşük kesme hızlarında yığıntı talaşın kesici geometrisini değiştirdiği görülmüştür (Resim 7.27.a). Ayrıca “A” harfi ile gösterilen kısımda yapışmanın kesme hattı üzerinde gerçekleştiği ve zamanla pekleştiği belirlenmiştir. Ayrıca bu bölgede abrasiv aşınma izleri açıkça görülmektedir. Kesme hızının artmasıyla birlikte kesme hattı üzerinde ve özellikle kesme hattı sonunda daha düşük yapışma eğilimi gerçekleşmiştir (7.27.b). Yer yer yan yüzeyde yapışmış ve kopmuş parçacıklarla birlikte abrasiv aşınma izleri de mevcuttur.



Resim 7.27. %10 B₄C takviyeli kompozitin KBN kesici takımla işlenmesi sonrasında çekilen kesici takım SEM fotoğrafları
a) Kesme hızı 50 m/min, b) Kesme hızı 110 m/min

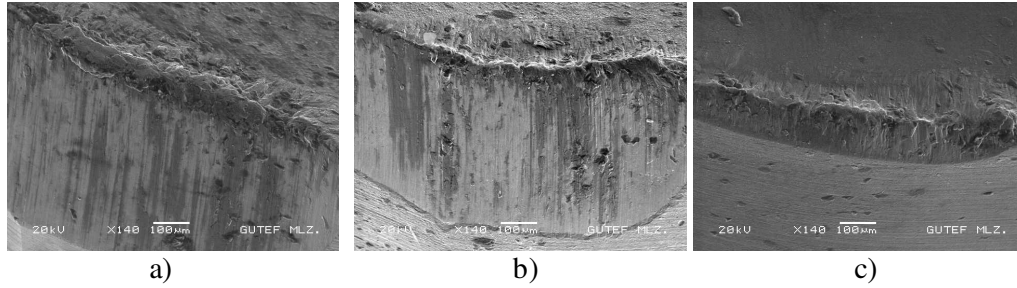
Resim 7.28 incelendiğinde düşük kesme hızında daha belirgin bir yapışmanın varlığından söz etmek mümkündür. Her iki kesme hızında da kesici kenar hattı boyunca MMK malzemenin hafif yapışma eğilimi görülmüştür. Belirgin bir krater aşınması görülmezken abrasiv ve yapışma ile oluşmuş yan yüzey aşınması belirgindir. Bu bölgede oluşan yapışmanın katmanı takım-talaş uzunluğunun artmasına neden olarak ikinci deformasyon bölgesinde takımın talaşlardan meydana gelen ilave basınçlara maruz kalmalarına neden olduğu ve kesme kuvvetlerini arttırdığı düşünülmektedir [176].



Resim 7.28. %5 Gr katkıli kompozitin KBN kesici takımla işlenmesi sonrasında çekilen kesici takım SEM fotoğrafları
a) Kesme hızı 50 m/min, b) Kesme hızı 110 m/min

Takım malzemeleri açısından aşınmanın değerlendirilmesi

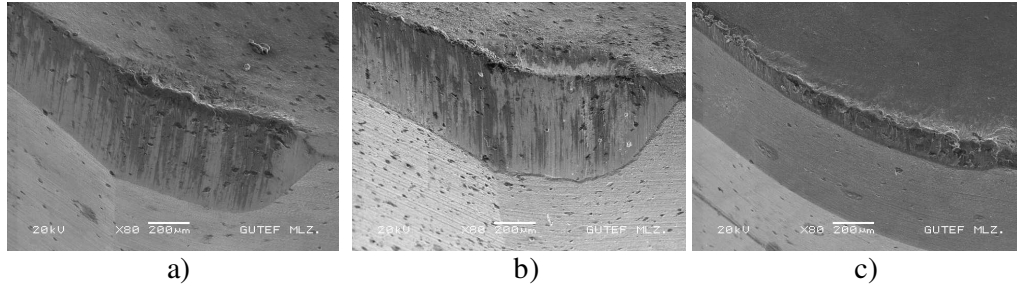
%10 B₄C takviyeli kompozitin 50 m/min kesme hızında işlenmesi sonrasında çekilmiş kesici takım SEM fotoğrafları Resim 7.29'da sunulmuştur.



Resim 7.29. %10 B₄C takviyeli kompozitin 50 m/min kesme hızında işlenmesi sonrasında çekilmiş kesici takım SEM fotoğrafları
a) Kaplamasız SK, b) Kaplamalı SK, c) KBN

İşleme deneyleri sonrasında kaplamalı SK kesicinin kaplamasız SK kesiciye kıyasla daha iyi olduğu görülmüştür. Kaplamalı SK kesici, kaplamasız SK takımla kıyaslandığında kesme hattı boyunca yapışmanın kalınlığının daha düşük olduğu söylenebilir (Resim 7.29.a, 7.29.b). Bu durum TiN kaplamanın düşük sürtünme katsayısı özelliğine bağlanabilir. Kaplamalı takıma kıyasla kaplamasız SK kesicide talaş yüzeyi üzerinde birikme eğilimi daha etkindir. KBN takım SK kesiciler ile kıyaslandığında ise, KBN kesicinin daha sert olması nedeni ile yan yüzey aşınmasının daha düşük gerçekleştiği ve kesme hattı boyunca biriken matris

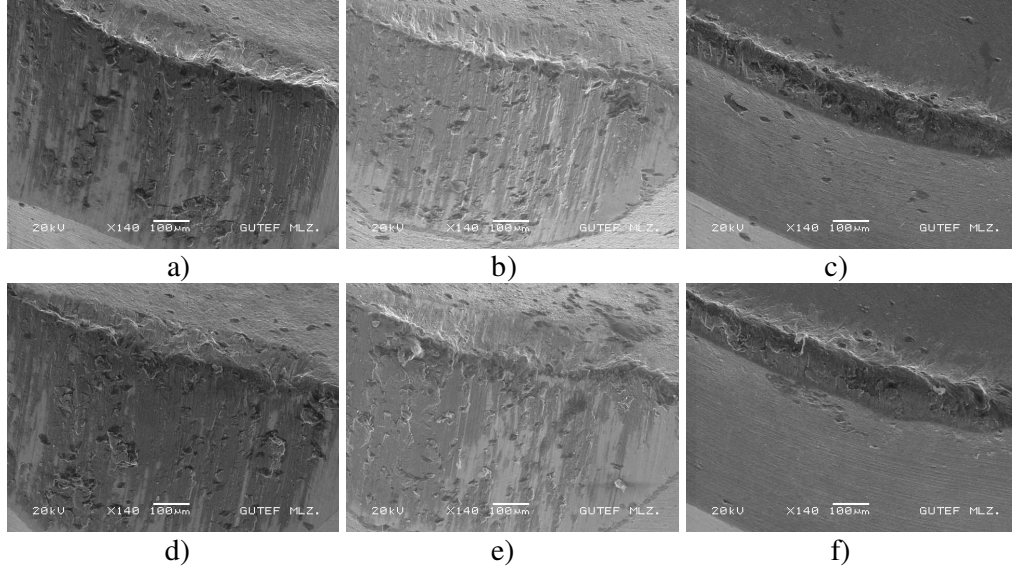
malzemesi görülmektedir (Resim 7.29.c). B_4C parçacık takviyeli kompozitlerin tüm kesicilerle 110 m/min kesme hızında işlenmesi sonrasında elde edilen SEM fotoğrafları Resim 7.30'da verilmiştir.



Resim 7.30. %10 B_4C takviyeli kompozitin 110 m/min kesme hızında işlenmesi sonrasında çekilmiş kesici takım SEM fotoğrafları
a)Kaplamasız SK, b) Kaplamalı SK, c) KBN

Resim 7.30'da artan kesme hızıyla birlikte tüm kesicilerde kesme hattı boyunca yığılma talaşının azaldığı görülmektedir. SK kesicilerde 50 m/min kesme hızına kıyasla 110 m/min'de esas kesme kenar geometrisinin bozulduğu belirlenmiştir. Bu durumun SK kesicilerde kesme kuvvetlerinin artmasına sebep olduğu düşünülmektedir. KBN kesicide ise 50 m/min kesme hızına oranla yan yüzey aşınmasında ciddi bir değişimden söz etmek mümkün değildir. Ayrıca kesici kenar geometrisini korumaktadır. Buda KBN kesicinin sertliğinin yüksek olmasına bağlanabilir. Artan kesme hızıyla birlikte kesme bölgesinde artan sıcaklıkların malzemenin yapışma eğilimini düşürerek kesme kuvvetlerini azalttığı düşünülmektedir. %10 B_4C takviyeli ve %5 Gr katkılı kompozitlerin 50 ve 110 m/min kesme hızlarında işlendikten sonra kesici takımların çekilen SEM fotoğrafları Resim 7.31'de verilmiştir.

Artan kesme hızıyla birlikte B_4C parçacık takviyeli kompozitlerin işlenmesine benzer eğilim görülmüştür. B_4C+Gr katkılı MMK'lerin işlenmesinde SK kesicilerde B_4C+Gr katkılı kompozite oranla yapışmanın kesme hattı ve talaş yüzeyi üzerinde azaldığı fakat kesici serbest yüzeyinde kararsız bir yapışmanın olduğu görülmektedir. KBN kesicilerde ise belirgin bir değişim görülmemektedir.



Resim 7.31. %5 Gr katkıli kompozitin 110 m/min kesme hızında işlenmesi sonrasında çekilmiş kesici takım SEM fotoğrafları
a)Kaplamasız SK, b) Kaplamalı SK c) KBN (50 m/min)
d) Kaplamasız SK, e) Kaplamalı SK, f) KBN (110 m/min)

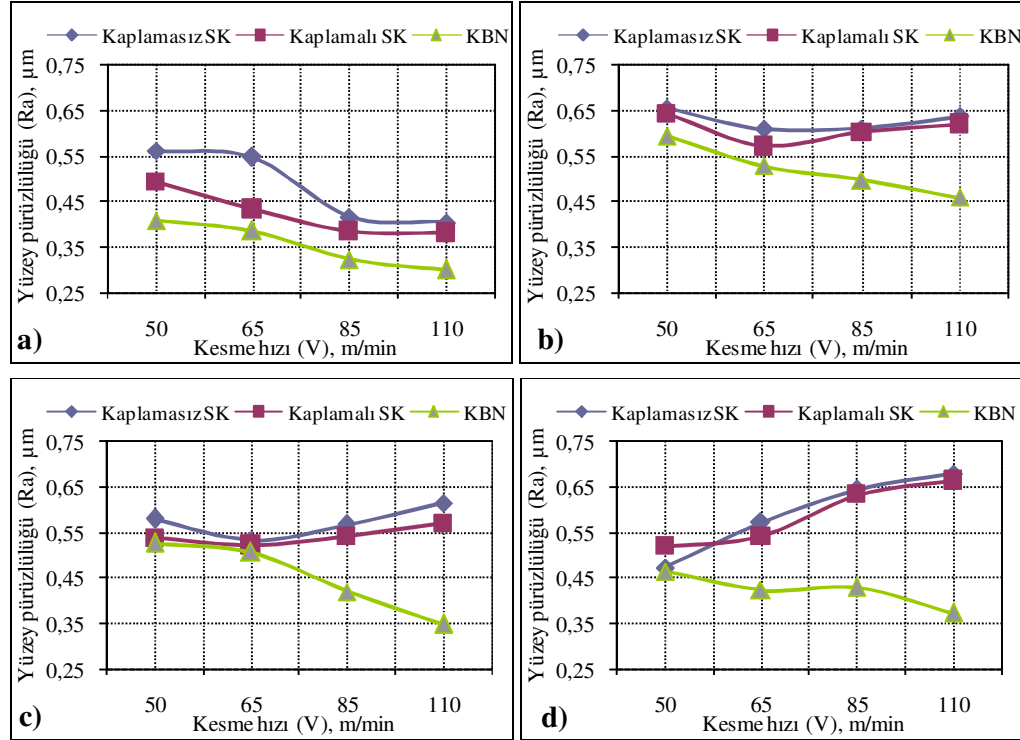
7.7.3.Yüzey pürüzlülüğünün değerlendirilmesi

Kaliteli iş parçalarının üretilmesinde yüzey pürüzlülüğü önemli bir parametredir [177]. Yüzey pürüzlülüğünün belirlenmesinde birçok faktör etkilidir. İlerleme hızı, kesici takım uç geometrisi, kesme hızı, kesme derinliği, kesici takım ve iş parçasının bağlama şartları yüzey pürüzlülüğü üzerindeki en etkili parametrelerdir. Yüzey pürüzlülüğü ölçümleri kesme kuvvetleriyle birlikte gerçekleştirilmiş olup işlenen yüzeyin üç farklı noktasından alınan ölçümlerin aritmetik ortalaması değerlendirilmiştir. Takviye elemanı tipi ve yüzde oranının yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkilerinin belirlenmesi açısından B₄C parçacık takviyeli ve B₄C+Gr katkıli kompozitlerin (Ra) ölçümleri ayrı ayrı incelenmiştir.

B₄C parçacık takviyeli kompozitlerin yüzey pürüzlülüğünün değerlendirilmesi

MMK malzemelerin işlenmesinde yüzey kalitesi kesme parametrelerinin yanı sıra takviye elemanının şekli, boyutu, yüzde hacim miktarı ve matris malzemesinin tipine

bağlı olarak değişmektedir. Artan B_4C takviye oranına bağlı olarak SK ve KBN kesicilerle elde edilen Ra değerleri Şekil 7.28’de sunulmuştur.



Şekil 7.28. Kesme hızına bağlı olarak B_4C takviyeli kompozitlerin frezelenmesinde ölçülen ortalama yüzey pürüzlülüğü değer grafikleri
a) Alumix 123 alaşımı, b) %5 B_4C , c) %10 B_4C , d) %15 B_4C takviyeli

MMK’lerin frezelenmesi esnasında yüzeyde takviye elemanın kırılma dayanımından kaynaklanan çukur ve çatlaklar oluşmaktadır. Şekil 7.28 incelendiğinde Ra değerleri bakımından artan kesme hızıyla birlikte kaplamalı ve kaplamasız SK kesicilerin bir birine yakın, KBN kesiciden ise yüksek değerlerde olduğu görülmektedir. Tüm takım için Ra değerlerinin $0,7 \mu\text{m}$ ’dan düşük değerlerde olduğu görülmüştür. Bunun nedeni olarak uygulanan yaşlandırma ısıl işlemi ile MMK’lerin sertliğinin artırılması ve takımın $2,12 \text{ mm}$ genişliğindeki esas kesme hattı düzgün bir kesme oluşturduğu ayrıca yardımcı kesme hattı da yüzeyi düzleştirerek yüzeyin kalitesini arttırdığı söylenebilir. Alumix 123 alaşımının işlenmesinde tüm kesiciler için (Şekil 7.28.a) kesme hızındaki artışa bağlı olarak yüzey pürüzlülüğünde paralel bir düşüş görülmektedir. Kesme hızı yüzey kalitesinin belirlenmesinde önemli bir rol

oynamaktadır. Düşük kesme hızlarında YT oluşumunun artması talaş kırılmasını arttırmakta ve yüzey pürüzlülüğünün artmasına neden olmaktadır. Artan kesme hızları ile birlikte YT oluşumu azalarak talaş kırılması azalmakta ve yüzey pürüzlülüğü iyileşmektedir [46]. Kesme hızındaki artışla birlikte yüzey pürüzlülüğü değerlerine göre kesici takımlar en iyiden en kötüye doğru; KBN, kaplamalı SK ve kaplamasız SK şeklinde sıralanır. Kesme hızının %120 oranında artırılması ile 110 m/min kesme hızı değerinde yüzey kalitesinde kaplamasız SK kesicide %28, kaplamalı SK kesicide %22 ve KBN kesicide %33 oranında iyileşme sağlanmıştır.

%5 B₄C takviyeli kompozitin işlenmesinde elde edilen yüzey pürüzlülüğü değerleri incelendiğinde kaplamalı ve kaplamasız SK kesicilerle 65 m/min kesme hızına kadar yüzey kalitesinde sırasıyla %7 ve %11'lik bir iyileşme sağlanmıştır (Şekil 7.28.b). Bu durum artan kesme hızına bağlı olarak kesme bölgesindeki sıcaklıkların artmasıyla birlikte Al matris ile B₄C parçacıklar arasındaki bağ kuvvetinin zayıflamasına bağlanabilir [46]. En yüksek kesme hızı 110 m/min'de yüzey kalitesinde kaplamasız SK kesicide %4,2 kaplamalı SK kesicide ise %7,7'lik bir kötüleşme tespit edilmiştir. MMK'lerin frezelenmesinde yüzey bütünlüğü kesme kuvvetleriyle direkt olarak ilişkilendirilmektedir [41]. Artan kesme hızına bağlı olarak Ra değerlerindeki bu kötüleşme MMK malzemelerin işlenmesinde hızlı takım aşınmasından dolayı işlenen yüzeyin aşırı deformasyona uğraması ile açıklanabilir [178]. Ulaşılan bu sonuç [36] çalışmalarıyla paralellik göstermektedir. KBN kesicide ise artan kesme hızıyla birlikte yüzey kalitesi %22,6 iyileşme görülmektedir. Bu sonuç KBN kesicinin aşınma direncine atfedilebilir. En iyi yüzey kalitesine (0,46 µm) KBN kesici takımla 110 m/min kesme hızında ulaşılmıştır.

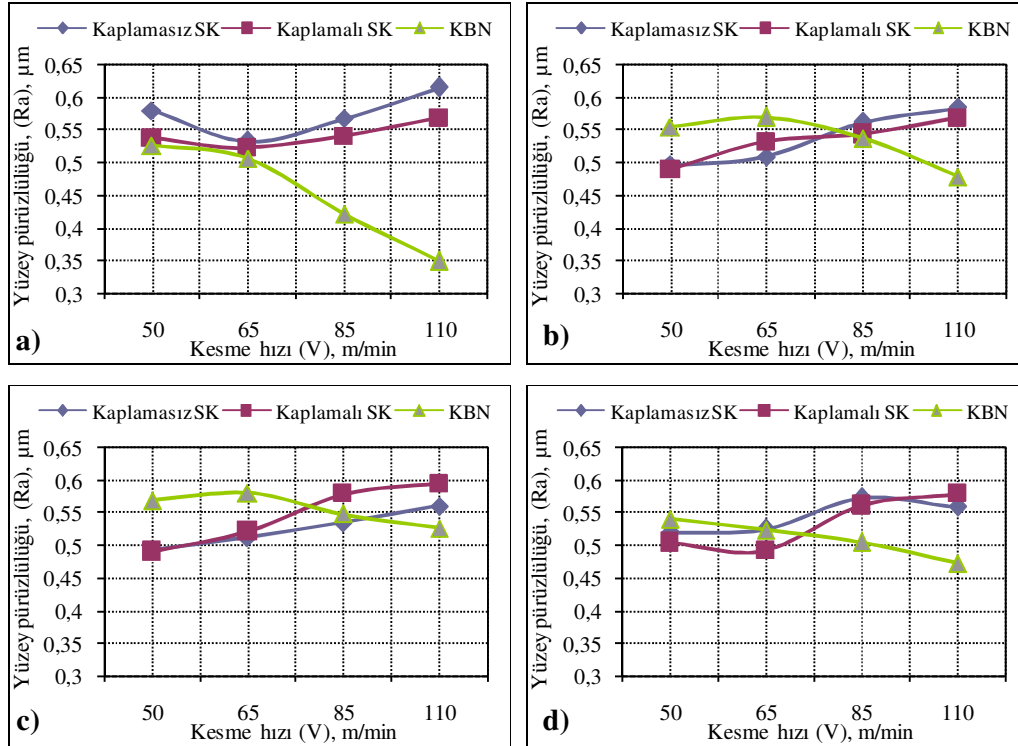
%10 B₄C takviyeli kompozitin işlenmesinde elde edilen yüzey pürüzlülüğü değerleri Şekil 7.28.c'de sunulmuştur. Artan kesme hızıyla birlikte Ra değerinde kaplamasız SK kesicide %7,6'lık, kaplamalı SK kesicide ise % 5,4'lük bir artış görülmüştür. Ra değerleri KBN kesici takım tarafından değerlendirildiğinde ise artan kesme hızıyla birlikte %34'e varan iyileşmeler görülmektedir. Tüm takımlar için % 5 B₄C takviyeli kompozitin işlenmesinde elde edilen Ra değerleri ile kıyaslandığında genel olarak (%3,4 - %24) arasında iyileşmenin varlığından söz etmek mümkündür.

Takviye oranının artmasıyla birlikte yüzey kalitesinin iyileşmesinin ana nedeni olarak çok ağır aşındırıcı etkinin iş parçası matris malzemesini yumuşatması ve kesici serbest yüzeyinin kompozitin yüzeyini kolaylıkla düzleştirebilmesi [41, 179] gösterilebilir. Ayrıca Ra değerlerindeki bu iyileşme % 10 B₄C takviyeli kompozitin sertliği ve daha fazla sert fazlı (partiküllü) mikroyapısına atfedilebilir.

%15 B₄C takviyeli kompozitin işlenmesinde kaplamalı ve kaplamasız SK kesicilerde artan kesme hızıyla birlikte (Şekil 7.28.d) Ra değerleri sırasıyla %30 ve %21,7 oranında kötüleşmiştir. Bu durum artan B₄C parçacık hacminin takım aşınması üzerindeki etkisine bağlanabilir. KBN kesicide ise artan kesme hızıyla birlikte % 19,3 oranında bir iyileşmeden söz etmek mümkündür. Benzer şekilde [180] nolu çalışmada da KBN takımların ana malzemesinin sertliklerinden dolayı minimum hasara uğramaları MMK malzemelerin bitirme işlemlerinde yüzey kalitesi bakımından kullanılacaklarını belirtmiştir. Tüm numuneler içerisinde en yüksek (0,68 µm) yüzey pürüzlülük değeri kaplamasız SK kesicide 110 m/min kesme hızında ölçülmüştür. En iyi yüzey kalitesine KBN kesici takımla 110 m/min kesme hızında 0,46 µm olarak ulaşılmıştır. Kesici takımlar MMK'lerin işlenmesinde Ra değerleri bakımından değerlendirildiğinde en iyiden kötüye doğru sırasıyla; KBN, kaplamalı ve kaplamasız SK kesici şeklindedir. Düşük kesme hızlarında SK kesiciler KBN kesiciye yakın performans sergilemişler fakat artan kesme hızıyla birlikte takım aşınmasına bağlı olarak performanslarını kaybetmişlerdir.

B₄C+Gr katkıli kompozitlerin yüzey pürüzlülüğünün değerlendirilmesi

%10 sabit B₄C oranı ile birlikte artan Gr parçacık miktarına bağlı olarak elde edilen yüzey pürüzlülük sonuçları Şekil 7.29'da sunulmuştur. B₄C+Gr katkıli kompozitlerin işlenmesi esnasında elde edilen yüzey pürüzlülük grafikleri (Şekil 7.29) incelendiğinde SK kesiciler için artan kesme hızıyla birlikte Ra değerlerinde artış, KBN kesicide ise düşüş görülmektedir.



Şekil 7.29. Kesme hızına bağlı olarak B₄C+Gr katkılı kompozitlerin frezelenmesinde ölçülen ortalama yüzey pürüzlülüğü değer grafikleri
a) Gr katkısız, b) %1 Gr, c) %3 Gr, d) %5 Gr katkılı MMK

SK kesicilerde Ra değerlerindeki artış hızlı takım aşınmasının kesici uç geometrisini değiştirmesi söylenebilir. KBN kesicilerde artan kesme hızına bağlı olarak Ra değerlerindeki iyileşme ise yüksek kesme hızlarında YT talaş oluşumunun düşmesine bağlanmaktadır. Kesme işlemi esnasında kopan grafit (~150 µm) parçacıkların büyük boşluk ve çukurlar oluşturarak yüzey kalitesini olumsuz yönde etkileyeceği düşünülebilir. Fakat artan Gr miktarı bağlı olarak, tüm kesici takımlar açısından, Ra değerlerinin iyileştiği görülmüştür. Bu durum kompozitlerin üretimi esnasında uygulanan basınç ile deforme olan Gr parçacıklarının (Resim 7.16.c) işleme esnasında kolaylıkla matris yapıdan ayrılmasına bağlanabilir. Ayrıca artan Gr miktarına bağlı olarak Ra değerlerinin (%10 B₄C) kompozite oranla düştüğü görülmüştür. MMK'lerin mekanik özelliklerinin kötüleşmesinden dolayı takım aşınmasındaki düşüşün Ra değerlerindeki iyileşmeye sebep olduğu düşünülmektedir. Grafit takviyesiz numunenin işlenmesinde 65 m/min kesme hızına kadar tüm kesiciler için Ra değerlerinde bir düşüş görülmektedir (Şekil 7.29.a). Bu kesme

hızından sonra KBN kesicide artan kesme hızına bağlı olarak %51'lik iyileşme görülmüştür. SK kesicilerde ise sırasıyla kaplamasız kesicide %6'luk, kaplamalı kesicide ise %5,7'lik bir kötüleşme tespit edilmiştir. %1 Gr katkıli kompozitin işlenmesinde elde edilen Ra değerleri incelendiğinde kaplamalı SK ve kaplamasız SK kesicilerin bir birine yakın olduğu görülmektedir (Şekil 7.29.b). SK kesicilerde 50 m/min kesme hızından %120 artış sonrasında kaplamasız kesicide %17, kaplamalı kesicide ise %16'lık kötüleşme görülmüştür. KBN kesicide ise %15,8'lik iyileşme görülmektedir. %3 Gr katkıli kompozitin (Şekil 7.29.c) işlenmesinde Ra değerleri kesici takım malzemelerine göre değerlendirildiğinde; en iyiden en kötüye doğru KBN, kaplamalı SK ve kaplamasız SK şeklindedir. 65 m/min kesme hızına kadar Ra değerlerinde SK kesiciler arasında bir fark görülmezken artan kesme hızıyla birlikte kaplamalı SK kesici daha kötü performans sergilemiştir. %5 Gr katkıli kompozitin oluşan yüzey pürüzlülükleri incelendiğinde diğer kompozitlerde meydana gelen kesme sürecine benzer bir durumdan söz edilebilir. Burada kesme hızının artmasına paralel olarak KBN kesicide Ra değerlerinin azaldığı (Şekil 7.29.d) görülmektedir. SK kesicilerde 65 m/min kesme hızına kadar Ra değerlerinde ciddi bir değişim görülmezken kesme hızının %30 arttırılmasıyla birlikte 85 m/min kesme hızında yüzey kalitesinde kaplamasız SK kesicide %9, kaplamalı SK kesicide ise %11'lik kötüleşme görülmüştür.

8. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Toz metalurjisi yöntemiyle B₄C parçacık takviyeli ve B₄C+Gr katkılı Alumix123 matrisli kompozitlerin üretimi gerçekleştirilmiştir. Üretilen MMK'lerin mikroyapı, mekanik özellikleri ve farklı uçlar kullanılarak frezede işlenebilirliği araştırılmıştır. Gerçekleştirilen bu çalışma sonrasında elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

- 1.Toz metalurjisi yöntemiyle ağırlıkça %5, %10, %15 B₄C parçacık takviyeli ve %10 B₄C takviyesine %1, %3, %5 Gr katkılı olmak üzere kompozitlerin sıcak presleme yöntemiyle yüksek yoğunluklu üretimi gerçekleştirilmiştir.
- 2.Sıcak presleme yönteminde 100 MPa ön şekillendirilme basıncı ve 590 °C sıcaklıkta 40 MPa sıcak presleme basıncının 15 dakika uygulanmasının MMK'lerin üretiminde yeterli olduğu belirlenmiştir.
- 3.Mikroyapı incelemeleri sonrasında parçacık takviyeli kompozitlerin incelenmesinde, B₄C parçacıklarının yapı içerisinde genel olarak homojen şekilde dağıldığı artan takviye parçacık oranıyla birlikte yer yer topaklaşma eğilimi olduğu görülmüştür. B₄C+Gr katkılı kompozitlerde ise genel olarak homojen bir dağılım gerçekleşmesine rağmen parçacık takviyeli kompozitlere nazaran dağılım daha düzensiz gerçekleşmiştir.
- 4.Koruyucu atmosfer kullanılmadan gerçekleştirilen sıcak presleme işlemi sonrasında numunelerin üretiminde düşük miktarlarda yoğunluk kaybı meydana gelirken, en düşük yoğunluk %5 Gr katkılı kompozitte görülmüştür. Bu numunedeki sinterlenmiş yoğunluk 2,672 gr/cm³ ölçülürken yoğunluk oranı %96,9 olarak hesaplanmıştır.
- 5.En yüksek yoğunluk Alumix 123 kodlu numunenin üretiminde %99,2 olarak elde edilmiştir. Üretilen MMK'lerin teorik yoğunlukları büyükten küçüğe sıralanacak olursa; %5, %10, %15 B₄C parçacık takviyeli, %1, %3, %5 Gr katkılı numuneler şeklinde meydana gelmiştir.

6. MMK numunelerin üretimi sonrasında yaşlandırma (T6) ısıl işlemi uygulanmış ve ısıl işlem sonrası en yüksek sertlik değeri %15 B₄C kodlu numunede 172,8 BHN olarak tespit edilmiştir. Isıl işlem öncesi ve sonrasında en yüksek sertlik değeri değişimi %105 olarak gerçekleştirilerek Alumix 123 kodlu numunede görülmüştür.
7. En yüksek çapraz kırılma dayanımı Alumix 123 kodlu numunede (582 MPa) elde edilirken kompozit numuneler içerisinde en yüksek ÇKM değerine 510 MPa olarak %5 B₄C takviyeli numunede ulaşılmıştır.
8. Kesici takımlarla gerçekleştirilen işlenebilirlik deneyleri sonrasında, takviye elemanı ve yüzde Gr miktarının kesici takım aşınması ve kesme kuvveti bileşenleri üzerinde etkili olduğu tespit edilmiştir. Artan B₄C miktarıyla birlikte takım aşınmaları ve kesme kuvvetlerinde belirgin bir artış olduğu gözlenmiştir.
9. Artan kesme hızı nedeniyle kesici kenarın aşınmasıyla sementit karbür kesicilerde kesme kuvvetlerinin arttığı, kübik bor nitrür kesicide ise düştüğü görülmüştür. Takımlar açısından kesme kuvvetleri büyükten küçüğe doğru sıralandığında; kaplamasız SK, kaplamalı SK ve KBN şeklinde gerçekleştiği tespit edilmiştir.
10. SK kesicilerde artan kesme hızıyla birlikte %5 B₄C takviyesine kadar kesme kuvvetlerinin azaldığı %10 B₄C takviyesine gelindiğinde %50, %15 B₄C takviyesine gelindiğinde ise kesme kuvvetlerinde %118'lik artışlar gerçekleştiği tespit edilmiştir. En yüksek kesme kuvveti değerine (217,89 N) olarak %15 B₄C kodlu numunede kaplamasız SK kesiciyle 110 m/min kesme hızında ulaşılmıştır. Bu duruma takım aşınmasının etkili olduğu belirlenmiştir. KBN kesicide artan kesme hızıyla birlikte kesme kuvvetlerinin azaldığı, artan parçacık miktarıyla ise arttığı tespit edilmiştir.

11. B₄C+Gr katkıli kompozitlerin işlenmesinde grafit miktarındaki artışla birlikte kesme kuvvetlerinde önemli düşüşler belirlenmiştir. Kaplamasız SK kesicide %16, kaplamalı SK kesicide ise %18, KBN kesicide ise %9'luk düşüşler görülmüştür.
12. Kesme kuvveti bileşenleri bakımından Alumix 123, %5 B₄C, %10 B₄C ve Gr katkıli tüm numuneler büyükten küçüğe doğru sıralandığında; Fc, Fr, Ff şeklinde olduğu görülmüştür. %15 B₄C kodlu numunede ise bu sıralama; Fr Fc, Ff şeklinde gerçekleşmiştir.
13. MMK'lerin işlenebilirliği açısından Fc bileşeni değerlendirildiğinde artan kesme hızıyla birlikte Alumix 123 kodlu numunede azaldığı, %5 B₄C kodlu numunede bir değişim göstermediği ve diğer tüm numunelerde ise arttığı tespit edilmiştir.
14. Takım aşınmaları artan Gr miktarına bağlı olarak değerlendirilmiş, tüm numunelerde kompozit malzemenin yapışması ve serbest yüzey kenar aşınması tespit edilmiştir. Aşınma değerleri SK kesiciler için (0,366-0,507 mm) arasında değiştiği, KBN kesicide ise 0,1 mm altında gerçekleştiği görülmüştür.
15. B₄C takviyeli kompozitlerin işlenmesinde yüksek takım aşınmasından dolayı SK kesiciler önerilmemektedir.
16. Sabit %10 B₄C oranına bağlı olarak artan Gr miktarıyla birlikte takım aşınmasının azaldığı görülmüştür. SK kesiciler için %3 Gr ilavesi kritik bir değer olarak tespit edilmiştir. Tüm kesme hızlarında %3 Gr ilavesi genel olarak kaplamasız ve kaplamalı kesiciler hemen hemen aynı aşınma değerine ulaştığı görülmüştür.
17. En yüksek takım aşınması değerlerine (0,507 mm) kaplamasız SK kesici ile, en yüksek kesme hızında (110 m/min) ulaşılmıştır. En düşük (0,07 mm)

takım aşınmasına 50 m/min kesme hızında KBN kesi takımla elde edilmiştir. Bu nedenle, B₄C+Gr katkılı kompozitlerin işlenmesinde KBN kesici takım önerilmektedir.

18.MMK'lerin işlenmesinde KBN kesicide artan kesme hızıyla birlikte Ra değerlerinin azaldığı görülmüştür. SK kesicilerle ise Alumix 123 ve %5 B₄C takviyeli numunelerin işlenmesinde Ra değerlerinin azaldığı, %10, %15 B₄C kodlu ve B₄C+Gr katkılı numunelerde ise arttığı tespit edilmiştir.

19.En yüksek Ra değeri, 0,68 µm olarak %15 B₄C kodlu numunenin 110 m/min kesme hızında kaplamasız SK kesiciyle işlenmesi sonrasında elde edilmiştir. Aynı kesme şartlarında %15 B₄C kodlu numunenin işlenmesinde KBN kesicide Ra değeri 0,375 µm olarak tespit edilmiştir.

20.En düşük Ra değeri 0,301 µm olarak Alumix 123 kodlu numunenin 110 m/min kesme hızında KBN kesiciyle işlenmesinde elde edilmiştir.

Elde edilen bu sonuçlar ışığında, bundan sonraki çalışmalarda aşağıdaki öneriler yapılabilir ve şu tür çalışmalar devam ettirilebilir;

1.SP yöntemiyle üretilen Alumix 123 matrisli B₄C takviyeli MMK'lerin aşınma özellikleri, darbe, çekme ve yorulma dayanımı gibi mekanik özellikleri detaylı bir şekilde incelenebilir.

2.Takviye tipi, boyutu ve yüzde hacim oranları değiştirilerek bu üretim parametrelerinin MMK'lerin mekanik ve işlenebilirlik özellikleri üzerindeki etkileri araştırılabilir.

3.İşlenebilirlik deneylerinde SK kesicilerin düşük performansı nedeniyle KBN kesiciler kullanılmalı ve farklı geometri ve kalitedeki KBN kesicilerin işlenebilirliği araştırılabilir.

- 4.İşlenen numunelerin yüzey bütünlüğünün değerlendirilmesi açısından işlenmiş yüzeylerin mikrosertlik ölçümleri gerçekleştirilerek yüzeyde oluşan hatalar detaylı bir şekilde incelenebilir.
- 5.Toz metalurjisi SP yöntemiyle üretilen MMK'lerin tornalama, delme, vida açma, tel erozyon gibi bitirme işlemleri uygulanarak farklı işlenebilirlik özellikleri araştırılabilir.

KAYNAKLAR

1. Ejiiofor, J.U., and Reddy, R.G., "Developments in the Processing and Properties of Particulate Al-Si Composites", *JOM*, 49 (11): 31-37 (1997).
2. Schawrtz, M. M., "Composites Materials Handbook 2nd ed." *Mc Graw Hill*, New York, 1-650 (1992).
3. Murakami, Y., "Aluminium-based Alloys", *Materials Science and Technology*, 8: 215-274 (1994).
4. Scudino, S., Liu, G., Prashanth, K.G., Bartusch, B., Surreddi, K.B., Murty, B.S., Eckert, J., "Mechanical properties of Al-based metal matrix composites reinforced with Zr-based glassy particles produced by powder metallurgy", *Acta Materialia*, 57: 2029–2039 (2009).
5. Karagöz, Ş., Ymanoğlu, R., Atapek, Ş.H., "Metalik Toz İşleme Teknolojisi ve Prosesleme Kademeleri Açısından Parametrik İlişkiler", *E.S.O.G.Ü. Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 12 (3): 77-87 (2009).
6. Fogagnolo, J.B., Robert, M.H., Ruiz-Navas, E.M., Torralba, J.M., "6061 Al reinforced with zirconium diboride particles processed by conventional powder metallurgy and mechanical alloying", *Journal of Materials Science*, 39: 127-132 (2004).
7. Kurt, A.O., "Toz Üretim Yöntemleri ve Sinterleme", S.A.Ü., Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Sakarya, 4-34 (2004).
8. Canakci, A., Arslan, F., Yasar, I., "Pre-treatment process of B₄C particles to improve incorporation into molten AA2014 alloy ", *Journal of Materials Science*, 442: 9536-9542 (2007).
9. Torralba, J.M., Costa, C.E.da, Velasco, F., "P/M aluminum matrix composites: an overview", *Journal of Materials Processing Technology*, 133: 203-206 (2003).
10. Zhan, Y.Z., Zhang, G., "The role of graphite particles in the high temperature wear of copper hydrid composites against steel", *Materials Desing*, 27: 79-84 (2006).
11. Davim, J.P., "Diamond tool performance in machining MMCs", *Journal of Materials Processing Technology*, 128: 100-105 (2002).
12. Li, A.J., Zhen, Y.H., Yin, Q., Ma, L.P., Yin, Y.S., "Microstructure and properties of (SiC, TiB₂)/B₄C composites by reaction hot pressing", *Ceramics International*, 32: 849-856 (2006).

13. Bedir, F., "Characteristic properties of Al–Cu–SiC and Al–Cu–B₄C composites produced by hot pressing method under nitrogen atmosphere", *Materials and Design*, 28: 1238–1244 (2007).
14. Wan-li, G.U., "Bulk Al/SiC nanocomposites prepared by ball milling and hot pressing method", *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 16: 398-401 (2006).
15. Jiang, Q.C., Wang, H.Y., Ma, B.X., Wang, Y., Zhao, F., "Fabrication of B₄C particulate reinforced magnesium matrix composite by powder metallurgy", *Journal of Alloys and Compounds*, 386: 177–181 (2005).
16. Zhang, H., Ramesha, K.T., Chin, E.S.C "High strain rate response of aluminum 6092/B₄C composites", *Materials Science and Engineering*, 384: 26–34 (2004).
17. Suresha S., Sridhara B.K., "Effect of addition of graphite particulates on the wear behaviour in aluminium–silicon carbide–graphite composites", *Materials and Design*, 31: 1804–1812 (2010).
18. Jianxin, D., Junlong, S., "Microstructure and mechanical properties of hot-pressed B₄C/TiC/Mo ceramic composites", *Ceramics International*, 35: 771-778 (2007).
19. Mohantya, R.M., Balasubramaniana, K., Seshadrib, S.K., "Boron carbide-reinforced aluminium 1100 matrix composites: Fabrication and properties", *Materials Science and Engineering*, 498: 42–52 (2008).
20. Estrada-Guela, I., Carreño-Gallardo, C., Cardoso-Cortés, J.L., Rocha-Rangel, E., Herrera-Ramírez, J.M., Martínez-Sánchez, R., "Effect of metallic addition on mechanical properties in an aluminum–graphite composite synthesized by means of mechanical milling", *Journal of Alloys and Compounds*, 495: 403–407 (2010).
21. Khana, K. B., Kutty, T.R.G., Surappa, M.K., "Hot hardness and indentation creep study on Al–5% Mg alloy matrix–B₄C particle reinforced composites", *Materials Science and Engineering*, 427: 76–82 (2006).
22. Nie C., Gao, J., Liu J., Zhang D., "Investigation on microstructures and interface character of B₄C particles reinforced 2024Al matrix composites fabricated by mechanical alloying", *Journal of Alloys and Compounds*, 454: 118–122 (2008).
23. Topcu, I., Gulsoy, H.O., Kadioglu, N., Gulluoglu, A.N., "Processing and mechanical properties of B₄C reinforced Al matrix composites", *Journal of Alloys and Compounds*, 482: 516–521 (2009).
24. Kennedy, A.R., "The microstructure and mechanical properties of Al-Si-B₄C metal matrix composites", *Journal of Materials Science*, 37: 317–323 (2002).

25. Hong, S., H., Chung, K., H., “Effects of vacuum hot pressing parameters on the tensile properties and microstructures of SiC -2124 Al composites”, *Materials Science and Engineering*, A194: 165-170 (1995).
26. İpek, R., “Adhesive wear behaviour of B₄C and SiC reinforced 4147 Al matrix composites (Al/B₄C–Al/SiC)”, *Journal of Materials Processing Technology*, 162–163 71–75 (2005).
27. Hasırcı, H., Gül, F., “B₄C/Al kompozitlerin takviye hacim oranına bağlı olarak abrasiv aşınma davranışlarının incelenmesi”, *SDU International Technologic Science*, 2: 15-21 (2010)
28. Çanakçı, A., Arslan, F., “Abresive wear behaviour of B₄C particle reinforced Al2024 MMCs”, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, (Baskıda)
29. Venkatesh, R., Hariharan, A.M., Muthukrishnan, N. “Machinability Studies of Al/SiC/ (20p) MMC by Using PCD Insert (1300 grade)” , *Proceedings of the World Congress on Engineering*, WCE, Vol II (2009).
30. Leng, J., Jiang, L., Zhang, Q., Wu, G., Sun, D., Zhou, Q., “Study of machinable SiC/Gr/Al composites”, *Journal of Materials Science*, 43: 6495–6499 (2008).
31. Ciftci, I., Turker, M., Seker, U., “CBN cutting tool wear during machining of particulate reinforced MMCs”, *Wear*, 257: 1041–1046 (2004).
32. Chou, YR. K., Liu, J., “CVD diamond tool performance in metal matrix composite machining”, *Surface & Coatings Technology*, 200: 1872–1878 (2005).
33. Ding, X., Liewb, W.Y.H., Liu, X.D. “Evaluation of machining performance of MMC with PCBN and PCD tools”, *Wear*, 259: 1225–1234 (2005).
34. Ciftci, I., Turker, M., Seker, U., “Evaluation of tool wear when machining SiCp-reinforced Al-2014 alloy matrix composites”, *Materials and Design*, 25: 251–255 (2004).
35. Manna, A., Bhattacharayya, B., “Influence of machining parameters on the machinability of particulate reinforced Al/SiC–MMC”, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 25: 850–856 (2005).
36. Özben, T., Kilickap, E., Cakır, O., “Investigation of mechanical and machinability properties of SiC particle reinforced Al-MMC”, *Journal of Materials Processing Technology*, 198: 220–225 (2008).

37. Turgut, Y., Çinici, H., Şahin, İ., and Findik, T., “ Study of cutting force and surface roughness in milling of Al/SiC metal matrix composites”, *Scientific Research and Essays*, 6(10): 2056-2062 (2011).
38. Muthukrishnan, N., Murugan, M., Rao, P. K., “Machinability issues in turning of Al-SiC (10p) metal matrix composites”, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 39: 211–218 (2008).
39. Muthukrishnan, N., Murugan, M., Rao, P. K., “An investigation on the machinability of Al-SiC metal matrix composites using pcd inserts”, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 38: 447–454 (2008).
40. Acır, A., Karakaş, S.M., Übeyli, M., Asal, Ö., “Metal matrisli kompozitlerin sinterlenmesinde kesici takım kaplamasının aşınmaya etkisinin deneysel incelenmesi”, *TİMAK-Tasarım İmalat Analiz Kongresi*, Balıkesir, 269-275 (2006).
41. Zhang, Q., Qiu, J., Wang Y., Gu, M., “Studies on machinability of Al/Sip+ SiCp composite materials”, *Journal of Materials Science*, 42: 5845–5850 (2007).
42. Kılıçkap, E., Cakır, O., Aksoy, M., Inan, A., “Study of tool wear and surface roughness in machining of homogenised SiC-p reinforced aluminium metal matrix composite”, *Journal of Materials Processing Technology*, 164–165: 862–867 (2005).
43. Seeman, M., Ganesan, G., Karthikeyan, R., Velayudham, A., “Study on tool wear and surface roughness in machining of particulate aluminum metal matrix composite-response surface methodology approach”, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 48: 613–624 (2010).
44. Şahin, Y., Sur, G., “The effect of Al₂O₃, TiN and Ti (C,N) based CVD coatings on tool wear in machining metal matrix composites”, *Surface and Coatings Technology*, 179: 349–355 (2004).
45. Basavarajappa S., “Tool Wear in Turning of Graphitic Hybrid Metal Matrix Composites”, *Materials and Manufacturing Processes*, 24: 484–487 (2009).
46. Bhushan, K. R., Kumar, S., Das, S., “Effect of machining parameters on surface roughness and tool wear for 7075 Al alloy SiC composite”, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 50: 459–469 (2010).
47. Karakaş, M.S., Acır, A., Übeyli, M., Onal, B., “Effect of cutting speed on tool performance in milling of B₄Cp reinforced aluminum metal matrix composites”, *Journal of Materials Processing Technology*, 178: 241–246 (2006).

48. Kök M., “A study on the machinability of Al₂O₃ particle reinforced aluminium alloy composite”, *IIBCC 11 th. International Inorganic-Bonded Fiber Composites Conference*, Madrid Spain November, 5-7: 272-281 (2008).
49. Übeyli M., Acır A., Keleş Ö., Akçay C.E., “Effect of cutting parameters on cutting force and surface roughness in milling alumina reinforced Al-6Zn-2Mg-2Cu composites”, *Powder Metallurgy*, 54 (2): 172-176 (2011).
50. Übeyli M., Acır A., M. S. Karakaş, Demir T., “On the Surface Roughness of Al-4%Cu/B₄C Metal Matrix Composites Machined by Milling Operation”, *Science and Engineering of Composite Materials*, 15: 131-139 (2008).
51. Acır A., Turgut Y., Ubeyli M., Günay M., Şeker U., “A Study on the Cutting Force in Milling of Boron Carbide Particle Reinforced Aluminum Composite”, *Science and Engineering of Composite Materials*, 16 (3): 187-195 (2009).
52. Strong, A.B., Armstrong, B., “Fundamentals of Composites Manufacturing: Materials Methods and Applications Second Edition”, *Society of Manufacturing Engineers*, USA, 1-600 (2007).
53. Agrawal, J. P., “Composite Materials”, Popular Science & Technology (PST), *DRDO Metcalfe House*, Delhi, 1-40 (1990).
54. Kaw, A.K., “Mechanics of Composite Materials, Crcort”, Washington, 1-106 (1997).
55. Chavla, N., and Chavla, K.K., “Metal Matrix Composites”, *Springer Science Business Media, Inc.*, Boston, 5-102 (2006).
56. Sur, G., “Karma takviyeli alüminyum matriksli kompozitlerin üretimi, mekanik özellikler ve işlenebilirliklerinin incelenmesi”, Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 42–116 (2008).
57. Mallick, P.K., “Composites Engineering Handbook”, *Einband 1. Marcel Dekker, Inc.*, New York, 1-650 (1997).
58. Gan, Y.X., “Effect of Interface Structure on Mechanical Properties of Advanced Composite Materials”, *International Journal of Molecular Sciences*, 10: 5115-5134 (2009).
59. Campbell, F.C., “Manufacturing processes for advanced composites”, *Elsiver Inc.*, New York, 10010-1710 (2004).
60. Masserdier, V., Fougères, R., Merle, P., “Mechanical properties of aluminium-based metal matrix composites reinforced with α -alumina platelets”, *Colloque C7, supplment au Journal de Physique*, 111(3):703-708 (1993).

61. Basavarajappa, S., Chandramohan, G., Dinesh, A., “Mechanical properties of MMC’s an experimental investigation”, *International Symposium of Research Students on Materials and Engineering*, India, 20-22 (2004).
62. Soy, U., “Metal Matris Kompozit Malzemeler”, *Sakarya Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Fotokopi Merkezi*, Sakarya, 3-35 (2009).
63. “Composite Materials Handbook”, Volume 4 Metal Matrix Composites, 1-124 (1999).
64. Geçkinli, E., “İleri teknoloji malzemeleri, ileri teknoloji seramikleri”, *İ.T.Ü. Matbaası Sayı:1454*, İstanbul, 1-250 (1991).
65. Kainer, K.U., “Basics of Metal Matrix Composites”, *Wiley-VCH Verlag GmbH&Co.*, Weinheim, 1-24 (2006).
66. Groover M.P. “Fundamentals of modern Manufacturing ”, Materials, Processes and Systems 4 th Edition. U.S.A. (2009).
67. Clyne, T.W., “Metal Matrix Composites: Matrices and Processing”, *Encyclopaedia of Materials: Science and Technology*, 3.7 – “Composites: MMC, CMC, PMC”, A Mortensen (ed.), *Elsevier*, (2001).
68. Sınmazçelik, T., “Makine Elemanlarında Kompozit Malzeme Kullanımı, Özellikleri Ve Tasarım İlkeleri” *Makine Tasarım ve İmalat Teknolojileri Kongresi*, Konya, 65-74 (2001).
69. Callister, JR., William D., “Fundamentals of Materials Science and Engineering/An Interactive eText 5th Edition”, *Wiley*, 1-502 (2000).
70. Chan, R.W., Haasen, P., Kramer, E.J., “Structure and properties of composites”, *Materials Science and Technology*, 13: 1–339 (1993).
71. Askeland, D.R., Fulay, P.P., Wright, W.J., “The Science and Engineering of Materials”, Composites Materials 6th Edition, *SI Edition, University of Missouri*, Rolla, 572-698 (1988).
72. Çanakçı, A., “AA2024 Matrisli B4C Parçacık Takviyeli Kompozitlerin Vorteks Yöntemiyle Üretimi ve Özelliklerinin İncelenmesi”, Doktora Tezi, *Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Trabzon, 1–40 (2006).
73. Uygur, I., “Environmentally Assisted Fatigue Response of Al-Cu-Mg-Mn with SiC Particulate Metal Matrix Composites”, Ph. D. Thesis, *University of Wales*, Swansea, (1999).

74. Girot, F.A., Quenisset, J.M., and Naslah, R., “Discontinuously Reinforced Aluminum Matrix Composites”, *Composites Science and Technology*, 30: 155-184 (1987).
75. Demirkesen, E., “Kompozit Malzemeler”, İ.T.Ü. Kimya-Metalurji Fakültesi, 1. Baskı, İstanbul, (1991).
76. Uygur, İ., Külekçi, M.K., “Low Cycle Fatigue Properties of 2124/SiCp Al-Alloy Composites”, *Turkish Journal of Engineering & Environmental Sciences*, 26: 265-274 (2002).
77. Arslan, N., Kaman, M.O., “Alüminyum, kağıt ve cam elyaf petek yapılı kompozitlerin üretim teknikleri ve mekanik özelliklerinin araştırılması”, *D.E.Ü. Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 4 (3): 113–123 (2002).
78. Solmaz, M.Y., Kaman, M. O., Turan, K., Turgut, A., “Petek Yapılı Kompozit Levhaların Eğilme Davranışlarının İncelenmesi”, *F.Ü. Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 22 (1): 1-11, (2010).
79. Enşici, A., “Polimer esaslı kompozit malzemeler ve ürün tasarımında kullanımları” *Designophy Tasarım Dergisi*, 2: 23–29 (2003).
80. Miller, W.S., Humphreys, F.J., “Strengthening mechanisms in particulate metal matrix composites.” *Scripta Metallurgica et Materialia*, 25 (1): 33-38 (1991).
81. Atik, E., Ünlü, B.S., Şen, O., Çavdar, U., “ Partikül takviyeli AlSi12CuNiMg Kompozitinin Aşınma ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi”, *Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 2 (2): 75-87 (2006).
82. Hanumanth, G.S., Irons, G.A., “Particle incorporation by melt stirring for the production of metal-matrix composites”. *Journal of Materials Science*, 28: 2459-2465 (1993).
83. Askeland, D.R., “The Science and Engineering of Materials”, Cilt1, Çeviri Editörü: Erdoğan, M., *PWS Publishing Company*, Boston, 265–284 (1998).
84. Smith, W.F., “Structure and Properties of Engineering Alloys”, Cilt 2, Çeviri Editörü: Erdoğan, M., *McGrawhill Inc.*, New York, 342–345 (2001).
85. “**ASM Handbook**”, Heat Treating, Heat Treating of Titanium and Titanium Alloys, Volume 4, ASM International, USA, 2043 (2011).
86. Yetgin, S.H., Köken, A., Aydın, M., Ünal, R., “Toz Metalurjisi Yöntemiyle Üretilmiş Al-B₄C MMK’lerde Karıştırıcı Tipi ve Takviye Oranının Mekanik ve Mikroyapı Özelliklerine Etkisi”, *4. Ulusal Toz Metalurjisi Konferansı*, Sakarya, 622-631 (2005).

- 87.Kamil, Ö., “Alüminyum esaslı SiC takviyeli kompozitlerin üretimi ve aşınma özelliklerinin araştırılması”, Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 1-23 (2006).
- 88.Catalog, “Tetrabor Boron Carbide Grains and Powders”, *Wacker Ceramics Wacker- Chemie GmbH Kempten Plant*, Kempten, (2000).
- 89.Karaçay, E., “Bor Barbür Bretimi ve Barakterizasyonu”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 1-45 (2008).
- 90.Kök, M., “Metal matriksli (Al₂O₃ takviyeli) kompozit malzemelerin üretimi ve seramik takımlarla islenebilirliğin araştırılması”, Doktora Tezi, *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Elazığ, 43-51 (2000).
- 91.Hughess, D.H., “Fibres reinforcement composite materials-Part 2”, *The Journal Inst. of Metals and Materials*, 45: 359-365 (1986).
- 92.Rajan, T.P.D., Pillai, R.M., Pai, B.C., “Rewiev, Reinforcement Coatings and Interfaces in Aluminium Metal Matrix Composites”, *Jornal of Materials Science*, 33: 3491-3503 (1998).
- 93.William, C., Harrigan, Jr., “Commercial Processing of Metal Matrix Composites”, *Materials Science & Engineering*, A244: 75-79 (1998).
- 94.Rohatgi, P.K., Asthana, R. ve Das, S., Solidification, Structures, and Properties of Cast Metal-Ceramic Particle Composites, *International Metals Reviews*, 31: 115-139 (1986).
- 95.Aqida, S.N., Ghazali, M.I., Hashim, J., “Effects of porosity on mechanical properties of metal matrix composite: An Overview”, *Jurnal Teknologi*, 40: 17-32 (2004).
- 96.Clegg, A.J., “Cast Metal Matrix Composites”, *Metals Engineering*, 312-319 (1991).
- 97.Hashim, J., Looney, L., Hashmi, M.S.J., “Metal matrix composites: production by the stir casting method”, *Journal of Materials Processing Technology*, 92 –93: 1–7 (1999).
- 98.Salamcı, E., “Spray Casting”, *G.Ü. Fen Bilimleri Dergisi*, 17 (2): 155-173 (2004).
- 99.Satyanarayana, K.G., Ojha, S.N., Naresh Nath Kumar, D., Sastry, G.V.S., “Studies on spray casting of Al-alloys and their composites”, *Materials Science and Engineering*, 304-306: 627-631 (2001).

100. Fletcher, T.R., Cornie, J.A., “A Capacitance technique for studying pressure infiltration” *Materials Science And Engineering*, A144: 159-163 (1991).
101. Cook, A.J., Werner, P.S., “Pressure infiltration casting of metal matrix composites” *Materials Science and Engineering*, A144: 189-206 (1991).
102. Assar, E. M., “Fabrication of metal matrix composite by infiltration process-part 2: experimental study” *Journal of Materials Processing Technology*, 86: 152-158 (1998).
103. Peng, H.X., Fan, Z., Mudher, D.S., Evans, J.R.G., “Microstructures and mechanical properties of engineered short fibre reinforced aluminium matrix composites”, *Materials Science and Engineering A*, 335: 207-216 (2002).
104. Kaczmar, J.W., Pietrzak, K., Wlosinski, W., “The production and application of metal matrix composite materials”, *Journal Materials Processing Technology*, 106: 58-67 (2000).
105. 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).
106. Akbulut, H., and Durman, M., “Temperature Dependent Strength Analysis of Short Fiber Reinforced Al-Si MMCs”, *Materials Science and Engineering*, 262 (1-2): 214-226 (1999).
107. Feng, Y.C., Geng, L., Li, A.B., Zheng, Z.Z., “Fabrication and characteristics of in situ Al₁₂W particles reinforced aluminum matrix composites by reaction sintering”, *Materials and Design*, 31: 965–967 (2010).
108. Li, G.R., Zhao, Y.T., Dai, Q.X., Cheng, X.N., Wang, H.M., Chen, G., “Fabrication and properties of in situ synthesized particles reinforced aluminum matrix composites of Al–Zr–O–B system”, *Jornal of Materials Science*, 42 (14): 5442–5447, (2007).
109. Aikin, R.M., “The Mechanical Properties of In-Situ Composites”, *The Minerals, Metals & Materials Society JOM*, 49 (8): 35-39 (1997).
110. Günay, M., “Toz Metalurjisi Yöntemiyle Üretilen Al-Si/SiC Kompozitlerin Mekanik ve İşlenebilirlik özelliklerinin Araştırılması”, Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 1–127 (2009).
111. German, R.M., ‘Powder Metallurgy Science’, *Metal Powder Industries Federation*, 2nd edition, USA, 5-400 (1994).
112. Apelian, D., Lawley, A., Mathur, P., Luo, X.J., “Fundamentals of Droplet Consolidation During Spray Deposition”, *Modern Developments in Powder*

- Metallurgy Proc. of the 1988 Inter. Pow. Metal . Conf.* USA, 19: 397-424 (1988).
113. Angelo P.C., Subramanian R., “Powder Metallurgy Science, Technology and Applications”, *PHI Learning Private Limited*, New Delhi, 1-234 (2009).
114. Brooks, R.G., Leatham, A.G., Dunstan, T.R., Moore, C., “Osprey Techonogy for Spray Deposited Preforms and Powders in Aeroscope”, *Aeroscope Materials fort he 1980’s. Metal Powder Report Conf.* Switzerland, 2-15 (1980).
115. Başaran, A., “Toz Metal Parçalara Isıl ve Mekanik Yüzey İşlemlerin Birlikte Uygulanabilirliğinin Araştırılması”, Doktora Tezi, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Isparta, 1-18 (2007).
116. Clyne, T.W., “Metal Matrix Composites: Matrices and Processing” *Encyclopaedia of Materials: Science and Technology*, Elsevier, (2001).
117. Srivatsan, T.S., Guruprasad, G., Black, D., Radhakrishnan, R., Sudarshan, T.S., “Influence of TiB₂ content on microstructure and hardness of TiB₂-B₄C composite”, *Powder Technology*, 159: 161-167 (2005).
118. Karagöz, Ş., Ymanoğlu, R., “PREP Atomizasyonu ile Üretilen Tozların Otomotiv Endüstrisinde Kullanımı”, *4. Otomotiv Kongresi Bildiriler Kitabı*, Bursa, 587-592 (2008).
119. German, R.M., “Powder Metallurgy & Particulate Materials Processing”, Çeviri Editörleri: Sarıtas, S., Türker, M., Durlu, N., *MPIF*, New Jersey, 4-272 (2007).
120. Powder Metallurgy Desing Handbook. Metal Powder Industries Federation, Princeton, New Jersey, (1989).
121. İnternet: “Türk Seramik Derneği”, <http://www.turkseramik.com> (2010).
122. Upadhyaya G.S., “Powder Metallurgy Technology”, *Cambridge International Science Publishing*, England, 4-114 (2002).
123. Chengchang, J., Lan, S., Hua, T., Xuanhui, Q., “Hot pressing of nanometer WC-Co powder”, *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials*, 25: 53-56, (2007).
124. Schatt, W., Wieters, K.P., “Powder Metallurgy: Processing and Materials”, *EPMA Publications*, 121-124, 132-134 (1997).

- 125.Cura, M.E., “Sıcak preslenmiş WC-Co/B₄C kompozitlerinin mekanik, manyetik ve mikroyapısal incelenmesi”, *Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 10-115 (2001).
- 126.Çelik, E., Çelik, Ö., Güven, S.Y., “Sıcak Pres Tasarımı ve Elmas Kesici Takım Üretimi”, *2. Ulusal Tasarım İmalat ve Analiz Kongresi*, Balıkesir, 281-289 (2010).
- 127.Suk-Joong L. Kang, “Sintering, Densification, Grain Growth and Microstructure”, *Elsevier Butterworth-Heinemann*, Oxford, 197-220 (2005).
- 128.Durmuş, H., “CO₂ Lazer Kaynağıyla birleştirilmiş Alüminyum Matrisli Kompozitlerin Kaynak Bölgesinin Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi”, *Doktora Tezi, Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Manisa, 1-150 (2006).
- 129.German, R.M., “Liquid Phase Sintering”, *DPPC*, New Jersey, 3-192 (1985).
- 130.Black, S.C., Chiles, V., Lissaman, A.J., Martin, S.J., “Principles of Engineering Manufacture”, *Butterwort Press*, 227-261 (1996).
- 131.Salak, A., Selecka, M., Danninger, H., “Machinability of Powder Metallurgy Steels”, *Cambridge International Science Publishing*, 80-88 (2005).
- 132.Akkurt, M.,“Takım Tezgahları,Talaş Kaldırma Yöntemleri ve Teknolojisi”, *Birsen Yayınevi*, 25-155 (1985).
- 133.Cürgül İ., Yetiştiren, H., Sınmazçelik, T., “Makina Tasarımı ve Şekillendirme Mekanikliği”, *Birsen Yayınevi*, İstanbul, 14-316 (2006).
- 134.Ezugwu, E.O., “Key improvements in the machining of difficult-to-cut aerospace superalloys”, *International Journal of Machine Tools, Manufacture*, 45: 1353–1367 (2005).
- 135.Çakır, M.C., “Modern Talaşlı İmalat Yöntemleri”, *Dora yayınevi*, Ankara, 25-216 (2010).
- 136.Özcan, E., “CNC Tezgahlarda Kullanılan Kesici Takımlarda Takım Aşınmasının Kesme Performansına Dinamik Etkileri”, *Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi*, 26-160 İstanbul (2001).
- 137.Mendi, F., “Takım tezgahları teori ve hesapları”, *Gazi kitapevi*, 113-151 (1999).
- 138.“ASM Metal Handbook”, Machining: Vol.16. *ASM International*, USA, 913-915 (1989).)

- 139.Taylan, F., “Sert malzemelerin frezelenmesinde takım aşınma davranışlarının belirlenmesi”, Doktora Tezi, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Isparta 1-37 (2009).
- 140.Altıntaş, Y., “Manufacturing Automation”, *Cambridge University Pres*, Vancouver, 10-200 (2000).
- 141.Özkan, S.S., “CNC Tezgahlarında Kesme Şartları ve İşleme Kalitesi Arasındaki İlişkinin Analizi”, Doktora Tezi, *Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 20-120 (2000).
- 142.Juneja, B.L., Sekhon, G.S., Seth, N., ‘Fundamentals of Metal Cutting and Machine Tools 2nd ed.’, *New Age International Publishers*, New Delhi, 110-118 (2005).
- 143.Tomac, N., Tonnessen, K., Rasch, F. O., Mikac, T., “A Study of Factors that Affect the Built-Up material Formation”, *Seventh International conference on advanced manufacturing systems processings*, New York, 183-192 (2005).
- 144.Grzesik, W., Krusynski, B., Ruszaj, A., “Surface Integrity of Machined Surfaces”, *Surface Integrity in Machining*, London, 145-163, (2010).
- 145.Trent, E.M., “Metal cutting”, *Butterworths Press*, London, 1-171 (1989).
- 146.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).
- 147.Günay, M., “Talaş kaldırma işlemlerinde kesici takım talaş açısının kesme kuvvetlerine etkisinin deneysel olarak incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 40-49 (2003).
- 148.Sağlam, H., “Frezelemede Kesme Parametreleri ile Kesme Kuvvetlerinin Değişimi ve Bunların Takım Aşınması ve Yüzey Pürüzlülüğü Üzerindeki Etkilerinin Deneysel İncelenmesi”, *Selçuk Teknik Online Dergisi*, 3 (1): (2001).
- 149.Akkurt, M., “Talaş kaldırma yöntemleri ve takım tezgahları”, *Birsen yayınevi*, İstanbul, 217-221 (1992).
- 150.Turgut Y., “Bağlama kalıplarında bağlama kuvvetlerinin hesaplanmasında kullanılan emniyet katsayılarının deneysel olarak incelenmesi”, Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 23-30 (2007).
- 151.Boothroyd, G., “Fundamentals of Metal Machining and Machine Tools”, International Student ed. 5th Printing, *McGraw-Hill*, New York, 81-204 (1981).

- 152.Gökkaya, H., Nalbant, M., “Talaş kaldırma sırasında ısı oluşumu ve dağılımı”, *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, (2): 33-43 (2006).
- 153.Zhang, J.H., “Theory and technique of precision cutting”, *Pergamon Press*, Oxford, 1–50 (1991).
- 154.Gu, J., Tung, S.C., Barber, G.C., “Wear mechanisms of milling inserts: dry and wet cutting”, *Wear Processes In Manufacturing*, 31-47 (1999).
- 155.Habalı, K., “Kesici takım kaplama malzemesinin takım-talaş ara yüzey sıcaklığı üzerindeki etkisinin deneysel olarak araştırılması”, Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Makine Eğitimi Bölümü*, Ankara, 83–104 (2003).
- 156.Sandvik Coromant, “Milling Catalog”, *Sandvik Coromant*, Sweden, D18-129 (2008).
- 157.ISO 4288, “Geometrical Product Specifications (GPS) -Surface texture: Profile method-Rules and procedures for the assessment of surface texture”, 1-8 (1996).
- 158.Sur, G., Şahin, Y., Gökkaya, H., “Ergimiş metal karıştırma ve basınçlı döküm yöntemi ile alüminyum esaslı tanecik takviyeli kompozitlerin üretimi”, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 20 (2): 233-238 (2005).
- 159.Vogelsang, M., Arsenault, R. J., Fisher, R.M., “An in situ HVEM study of dislocation generation at Al/SiC interfaces in metal matrix composites”, *Metallurgical and Materials Transactions A*, 17: 379-389 (1986).
- 160.Qin, S., Chen, C., Zhang, G., Wang, W., Wang, Z., “The effect of particle shape on ductility of SiCp reinforced 6061 Al matrix composites”, *Materials Science and Engineering A*, 272: 363-370 (1999).
- 161.Viala, J.C., Bouix, J., and Gonzalez, G., “Chemical reactivity of aluminum with boron carbide”, *J.Mater. Scie.*, 32 (17): 4559 (1997).
- 162.Srivatsan, T.S., Annigeri, R., “The Quasi-Static and Cyclic Fatigue Fracture Behavior of 2014 Aluminum Alloy Metal-Matrix Composites”, *Metallurgical and Materials Transactions A*, 31(A): 959-974 (2000).
- 163.Tönsshoff, H.K., Wobker, H.G., Brunner, G., “CBN Grinding with Small Wheels”, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 44 (1): 311-316 (1995).
- 164.Sun, F.H., Wu, Z. Y., Zhong J. W., and Chen, M., ‘High speed milling of SiC particle reinforced aluminum-based MMC with coated carbide inserts’, *Key Engineering Materials*, 274–276, 457–462 (2004).

- 165.Xie, J.Q., Bayoumi, A.E., Zbib, H.M., “FEA modelling and simulation of shear localized chip formation in metal cutting”, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 38: 1067-1087 (1998).
- 166.Çifçi, İ., “Östenitik paslanmaz çeliklerin işlenmesinde kesici takım kaplamasının ve kesme hızının kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülüğüne etkisi”, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 20 (2): 205-209, (2005).
- 167.Çifçi, İ., “Machining of austenitic stainless steels using CVD multi-layer coated cemented carbide tools”, *Tribology International*, 39: 565-569 (2006).
- 168.Lima, J.G., Avila, R.F., Abroa, A.M., Faustino, M., Paulo, Davim, J., “Hard turning AISI 4340 high strength low steel and AISI D 2 cold work steel”, *Journal of Materials Processing Technology*, 169: 388-395, (2005).
- 169.Ezugwu, E.O. and Okeke, C.I., “Effects of Coating Materials on the Machinability of a Nickel Base, C-263, Alloy”, *Tribology Transactions*, 43 (3): 549-553 (2000).
- 170.Sur., G., Gülesin, M., “Karma Takviyeli Kompozitin CBN Kesici Takımlarla İşlenmesinde Kesici Takım Özelliklerinin Kesme Kuvvetleri Üzerindeki Etkileri”, *6. International Advanced Technologies Symposium*, Elazığ, 175-179 (2011).
- 171.Kannan, S., Kishawy, H.A., Deiab, I.M., Surappa, M.K., “On The Role of Reinforcements on Tool Performance During Cutting of Metal Matrix Composites”, *Journal of Manufacturing Processing*, 8 (2): 67-75 (2006).
- 172.Leon, C.A., Drew, R.A.L., “The influence of nickel coating on the wettability of aluminum on ceramics, *Composites: Part A*, 33: 1429-1432 (2002).
- 173.Heck, M., Ortner, H.M., Flege, S., Reuter, U., Ensinger, W., “Analytical investigations concerning the wear behaviour of cutting tools used for the machining of compacted graphite iron and grey cast iron”, *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials*, 26: 197-206 (2008).
- 174.Özçatalbaş, Y., “Chip and built-up edge formation in the machining of in situ Al₄C₃-Al composite”, *Materials and Design*, 24: 215-221 (2003).
- 175.Davim, J.P., “Machining of metal matrix composites”, *Springer-Verlag London Limited*, New York, 13-19 (2012).
- 176.Sandvik Coromant, “Modern metal cutting-A practical handbook”, English Edition, *Sandvik Coromant*, Sweden, I-III (1994).

177. Dhanasekar, B., Ramamoorthy, B. "Restoration of blurred images for surface roughness evaluation using machine vision", *Tribology International*, 43: 268–276 (2010).
178. El-Gallab, M., Sklad, M., "Machining of Al/SiC particulate metal-matrix composites, Part III: Comprehensive tool wear models", *Journal of Materials Processing Technology*, 48: 291-297 (1995).
179. El-Gallab M, Kwan-Sup S, Yang M, "Machining of Al/SiC particulate metal-matrix composites, PartII: Workpiece surface integrity" *Journal of Materials Processing Technology*, 83: 277-286 (2008).
180. Hung, N.P., Boey, F.Y.C., Khour, K.A., Phua, Y.S., Lee, H.F., "Machinability of aluminium alloys reinforced with silicon carbide particulates", *Journal of Materials Processing Technology*, 56: 966-977 (1999).

EKLER

EK-1 Alumix 123 kodlu matris tozunun boyut analizi



MASTERSIZER 2000

Result Analysis Report

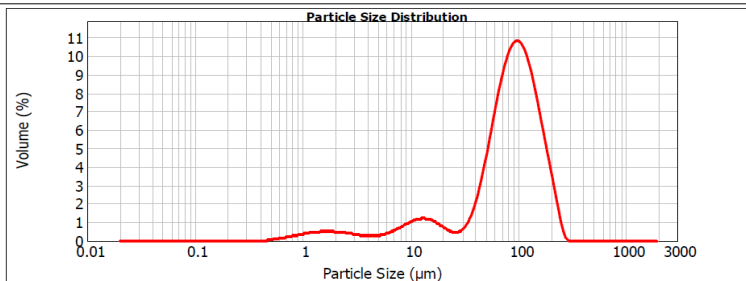
Sample Name: AI123 - Average **SOP Name:** **Measured:** 10 Ekim 2011 Pazartesi 13:34:12
Sample Source & type: **Measured by:** Ergün EKİCİ **Analysed:** 10 Ekim 2011 Pazartesi 13:34:14
Sample bulk lot ref: **Result Source:** Averaged

Particle Name: Aluminium **Accessory Name:** Hydro 2000G (A) **Analysis model:** General purpose **Sensitivity:** Normal
Particle RI: 2.500 **Absorption:** 3 **Size range:** 0.020 to 2000.000 μm **Obscuration:** 1.88 %
Dispersant Name: Water **Dispersant RI:** 1.330 **Weighted Residual:** 1.928 % **Result Emulation:** Off

Concentration: 0.0044 %Vol **Span :** 1.752 **Uniformity:** 0.494 **Result units:** Volume

Specific Surface Area: 0.302 m^2/g **Surface Weighted Mean D[3,2]:** 19.881 μm **Vol. Weighted Mean D[4,3]:** 92.722 μm

d(0.1): 13.909 μm **d(0.5):** 87.841 μm **d(0.9):** 167.787 μm



AI123 - Average, 10 Ekim 2011 Pazartesi 13:34:12

Size (μm)	Volume in %	Size (μm)	Volume in %	Size (μm)	Volume in %	Size (μm)	Volume in %	Size (μm)	Volume in %	Size (μm)	Volume in %
0.010	0.00	0.105	0.00	1.006	0.38	11.482	1.07	120.226	8.53	1258.925	0.00
0.011	0.00	0.120	0.00	1.259	0.42	13.183	1.07	138.038	7.13	1445.440	0.00
0.013	0.00	0.138	0.00	1.445	0.44	15.136	0.80	158.489	5.52	1659.587	0.00
0.015	0.00	0.158	0.00	1.660	0.44	17.378	0.59	181.970	2.33	1905.461	0.00
0.017	0.00	0.182	0.00	1.905	0.42	19.953	0.43	208.930	0.01	2187.762	0.00
0.020	0.00	0.209	0.00	2.188	0.39	22.909	0.44	238.883	0.00	2511.886	0.00
0.023	0.00	0.240	0.00	2.512	0.29	26.303	0.72	275.423	0.00	2884.032	0.00
0.026	0.00	0.275	0.00	2.884	0.25	30.200	1.37	316.228	0.00	3311.311	0.00
0.030	0.00	0.316	0.00	3.311	0.22	34.674	2.41	363.078	0.00	3801.894	0.00
0.035	0.00	0.363	0.00	3.802	0.23	39.811	3.82	416.969	0.00	4365.158	0.00
0.040	0.00	0.417	0.00	4.365	0.23	45.709	5.44	478.630	0.00	5011.872	0.00
0.046	0.00	0.479	0.00	5.012	0.27	52.481	7.08	549.541	0.00	5754.369	0.00
0.052	0.00	0.550	0.03	5.754	0.36	60.256	9.46	630.957	0.00	6606.934	0.00
0.060	0.00	0.631	0.10	6.607	0.50	69.183	12.58	724.436	0.00	7585.776	0.00
0.069	0.00	0.724	0.21	7.586	0.66	79.433	16.96	831.764	0.00	8709.636	0.00
0.079	0.00	0.832	0.27	8.710	0.83	91.201	22.86	954.993	0.00	10000.000	0.00
0.091	0.00	0.955	0.33	10.000	0.98	104.713	30.46	1096.478	0.00		
0.105	0.00	1.096	0.38	11.482	0.98	120.226	40.00	1258.925	0.00		

Operator notes:

Malvern Instruments Ltd.
Malvern, UK
Tel : +[44] (0) 1684-892456 Fax +[44] (0) 1684-892789

MasterSizer 2000 Ver. 5.60
Serial Number : MALL100720

File name: okcumler
Record Number: 936
10.10.2011 13:36:58

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : EKİCİ, Ergün
 Uyuğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 01.10.1983 Tokat
 Medeni hali : Bekar
 Telefon : 0 (380) 735 51 99
 e-mail : ergunekici@duzce.edu.tr

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Yüksek lisans	Karabük Üniversitesi /Fen. Bil. Ens. Mak. Eğt. Böl.	2009
Lisans	Gazi Üniversitesi/Tek. Eğt. Fak.Mak. B.	2005
Lise	Edirne Teknik Lisesi	2000

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2009-2012	Düzce Üniversitesi	Öğretim Görevlisi

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

SCI, SCI Expanded SSCI, AHCI tarafından taranan bilimsel dergilerde yayınlanan makaleler

1. B.İşık, E.Ekici, Experimental investigations of damage analysis in drilling of woven glass fiber-reinforced plastic composites, Int. J. Adv. Manuf. Technology (2010) Vol. 49, Numbers 9-12, pp.861-869.
2. Çiçek A., Kıvak T., Uygur, I., Ekici, E. And Turgut, Y., “Performance of cryogenically treated M35 HSS drilling of austenitic stainless steels”, Int. J. Adv. Manuf. Technology, (2012) Vol. 60, pp. 65-73.

Ulusal hakemli dergilerde yayımlanan makaleler :

1. Ekici, E. Işık, B., “Experimental Investigation Of Surface Damage Occurred On The Sides Of Hole Entrance In Drilling Of Glass-Fiber Reinforced Polymer Composite”, *Materials, Technology*, 13(1) 1-10, 2010.
2. Çiçek, A., Ekici, E., Uygur, İ., Akıncıoğlu, S., Kıvak, T., “AISI D2 Soğuk İş Takım Çeliğinin Derin Kriyojenik İşlemin Takım Ömrü Üzerindeki Etkilerinin Araştırılması”, *SDU International Journal of Technological Science*, 4(1) 1-9, 2012.

Uluslararası bilimsel toplantılarda sunulan ve bildiri kitabında (Proceedings) basılan bildiriler :

1. Ekici, E., Işık, B., “Camelyaf takviyeli plastik kompozit malzemenin işlenmesi esnasında kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne etkilerinin incelenmesi”, 5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS’11), 13-15 Mayıs 2009, Karabük, Türkiye.
2. Kıvak, T., Çiçek, A., Turgut, Y., Uygur, İ., Ekici, E., “Paslanmaz çeliğin delinmesinde Nano kaplamaların kesme kuvveti, delik çapı ve takım ömrü üzerindeki etkileri”, 6. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS’11), 16-18 Mayıs 2011, Elazığ, Türkiye.
3. Çiçek, A., Kıvak, T., Turgut, Y., Uygur, İ., Ekici, E., “Derin kriyojenik işlemin kesme kuvveti ve delik çapları üzerine etkileri”, 6. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS’11), 16-18 Mayıs 2011, Elazığ, Türkiye.
4. Turgut, Y., Çiçek, A., Kıvak, T., Uygur, İ., Ekici, E., “Çok katlı kaplamaların AISI 304 paslanmaz çeliğin işlenebilirliği üzerindeki etkileri”, 6. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS’11), 16-18 Mayıs 2011, Elazığ, Türkiye.
5. Ekici E., Gülesin, M., Özçatalbaş, Y., “Ön Karıştırılmış ve Sıcak Preslenmiş Al-Cu Alaşımı Toz Metal Parçalarda Kirkendall Etkisi ve Fiziksel Özelliklerinin Araştırılması”, 6 International Powder Conference Exhibition, 5-9 Ekim 2011, Ankara Turkey

Kitaplar:

Mahmut Gülesin, Abdulkadir Güllü, Yunus Kayır, Ergün Ekici (2005). "*Catia CAM Modülü İle İmalat*". Catia CAM komutları Türkiye. Asil.

Projeler

“Alüminyum Esaslı Karma Takviyeli Kompozitlerin Farklı Takviye Elemanı Tipleriyle Üretimi, Mekanik Özellikleri Ve Frezede İşlenebilirliğinin İncelenmesi”, *Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projesi (BAP)*, Ankara.
Proje Kodu: 07/2010-37

Proje Yöneticisi: Prof. Dr. Mahmut GÜLESİN
Projedeki Görevi: Yardımcı Araştırmacı

“AISI H13 Sıcak İş Takım Çeliğinin İşlenmesinde Kriyojenik İşlemin Yüzey Kalitesi Ve Takım Ömrü Üzerindeki Etkilerinin Araştırılması”, *Düzce Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projesi (BAP)*, Düzce
Proje Yöneticisi: Doç. Dr. Adem ÇİÇEK
Projedeki Görevi: Yardımcı Araştırmacı