Al MATRİSLİ α-Si_3N4 TAKVİYELİ KOMPOZİT MALZEME ÜRETİMİ VE İŞLENEBİLİRLİĞİNİN KARAKTERİZASYONU

Ersin BAHÇECİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
METAL EĞİTİMİ

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

EYLÜL 2006
ANKARA

Ersin BAHÇECİ tarafından hazırlanan Al MATRİSLİ α-Si_3N_4 TAKVİYELİ KOMPOZİT MALZEME ÜRETİMİ VE İŞLENEBİLİRLİĞİNİN KARAKTERİZASYONU adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Doç. Dr. Yusuf ÖZÇATALBAŞ
Tez Yöneticisi

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Metal Eğitimi Anabilim Dalında Yüksek lisans/Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan: : Prof. Dr. Mahmut GÜLESİN

Üye : Doç. Dr. Halil ARIK

Üye : Doç. Dr. Yusuf ÖZÇATALBAŞ

Tarih : 22/09/2006

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

TEZ BİLDİRİMİ

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

Ersin BAHÇECİ

Al MATRİSLİ α-Si_3N_4 TAKVİYELİ KOMPOZİT MALZEME ÜRETİMİ VE İŞLENEBİLİRLİĞİNİN KARAKTERİZASYONU

(Yüksek Lisans Tezi)

Ersin BAHÇECİ

GAZİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Eylül 2006

ÖZET

Bu çalışmada, toz metalurjisi yöntemiyle Al matrisli parçacık takviyeli malzeme (MMK_p) üretimi ve işlenebilirlik özelliklerinin araştırılması amaçlanmıştır. Gaz atomize yöntemiyle üretilmiş Al tozu ile ağırlıkça % 5, % 10 ve % 15 oranlarında α-Si_3N_4 seramik parçacık takviye elemanı, bilyalı atritörde 1 saat karıştırılmıştır. Karışım tozlar, çapraz kırılma numuneleri (ÇKN) ve işlenebilirlik numuneleri üretmek için 800 MPa basınçta preslenmiştir. Preslenen numuneler 650 ^oC sıcaklıkta 2 saat süreyle N_2 atmosferi altında sinterlenmiştir. Sinterlenmiş ÇKN' lerinin mekanik özellikleri belirlenmiş ve metalografik incelemeler yapılmıştır. İşlenebilirlik deneyleri PCD ve K10 kesici takımlarla, farklı kesme hızlarında kuru tornalama işlemiyle yapılmıştır. İşlenebilirlik, talaş kökü incelemeleri, kesme kuvvetleri, yüzey pürüzlülüğü ve talaş tipleriyle karakterize edilmiştir. Takviye miktarındaki artışla çapraz kırılma dayanımında azalma, sertlikte ise artış gözlenmiştir. En yüksek çapraz kırılma dayanımı % 10 seramik takviye içeren MMK malzemelerde belirlenmiştir. MMK malzemelerin α-Si_3N_4 oranı artıkça yüzey kalitesinin iyileştiği ve tornalama kuvvetlerinin azaldığı gözlenmiştir.

PCD takımla işlemede, minimum yüzey pürüzlülüğü ve minimum tornalama kuvvetleri belirlenmiştir. Alüminyum matrisin K10 takıma yapışma eğilimi, aşırı yığıntı talaş (YT) oluşumuna ve dolayısıyla kötü yüzey kalitesine sebep olmuştur.

Bilim Kodu : 710
Anahtar Kelimeler :Toz metalurjisi (TM), Metal matrisli kompozit (MMK), İşlenebilirlik, PCD, K10, Si_3N_4
Sayfa Adedi : 131
Tez Yöneticisi : Doç. Dr. Yusuf ÖZÇATALBAŞ

PRODUCTION OF Al BASED COMPOSITE REINFORCED WITH α-Si_3N_4 AND CARACTERIZATION OF ITS MACHINABILITY PROPERTIES
(M.Sc. Thesis)

Ersin BAHÇECİ

GAZI UNIVERSITY
INSTUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY
September 2006

ABSTRACT

The aims of this study, are to produce Al based composite reinforced with particulate (MMC_p) by powder metallurgy technique and to investigate its machinability properties. Al powders and 5, 10 and 15% weight ratios of α-Si_3N_4 particulates were mixed in an attritor for one hour. To produce transverse rupture test and machinability test block samples, the mixed powders were compacted at 800 MPa. Compacted block samples were sintered at 650 ^oC for 2 hours in N_2 atmosphere. Mechanical properties and microstructure of sintered samples have been investigated. Machinability tests were carried out by dry turning with PCD and K10 tools at different cutting speeds. Machinability has been characterized with turning forces, surface roughness, chip types and chip formation. By increasing the percentage of Si_3N_4 weight ratio, transverse rupture strength (TRS) decreased and the hardness of MMC samples increased. The highest TRS value was observed for the MMC_p including 10% ceramic reinforcing materials. It was determined that the machined surface roughness and turning forces of MMC_p decreased with increasing α-Si_3N_4 ratio.

During the machining of MMC_p with PCD tool, minimum surface roughness and minimum turning forces formed. Adhering tendency of Al matrix to the K10 tool caused excessive built-up edge formation and poor surface quality.

Science Code : 710
Key Words : Metal matrix composite (MMC), Powder metallurgy (P/M), Machinability, PCD, K10, Si_3N_4
Page Number : 131
Adviser : Assoc. Prof. Yusuf ÖZÇATALBAŞ

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca büyük yardım ve katkılarıyla beni bilgi ve tecrübeleriyle yönlendiren değerli hocam Doç. Dr. Yusuf ÖZÇATALBAŞ' a teşekkürü bir borç bilirim.

Çalışmalarımda kıymetli tecrübelerinden ve bilgilerinden faydalandığım hocalarım Prof. Dr. Mehmet TÜRKER ve Doç. Dr. Halil ARIK' a, ayrıca işlenebilirlik çalışmalarımda yardımlarını esirgemeyen Arş. Gör. Mustafa GÜNAY' a, yine metalografik çalışmalarda bana yardım eden Arş. Gör. Volkan KILIÇLI' ya, beni hiçbir zaman yalnız bırakmayan çok değerli arkadaşlarım İsmail OVALI ve Yaşar ÇAKAR' a teşekkürü bir borç bilirim.

Beni bugüne kadar yetiştiren ve maddi manevi hiçbir desteğini esirgemeyen başta babam Mithat BAHÇECİ ve annem Nazire BAHÇECİ' ye, ayrıca yapılan çalışmalarımda her türlü yardımı esirgemeyen abim bilgisayar sistemleri öğretmeni Ersen BAHÇECİ' ye, yine kardeşim Ceylan BAHÇECİ ' ye teşekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET iv

ABSTRACT vi

TEŞEKKÜR viii

İÇİNDEKİLER ..... *ix*

ÇİZELGELERİN LİSTESİ xiii

ŞEKİLLERİN LİSTESİ xiv

RESİMLERİN LİSTESİ xviii

SİMGELER VE KISALTMALAR xix

1. GİRİŞ 1

2. TOZ METALURJİSİ 4

2.1. Metal Tozlarının Üretim Yöntemleri 5

2.1.1. Mekanik yöntemler 5

2.1.2. Elektroliz yolu ile üretim 7

2.1.3. Kimyasal yöntemler 7

2.1.4. Atomizasyon yöntemleri 9

2.2. Metal Tozlarını Presleme 13

2.2.1. Presleme öncesi tozların karıştırılması 15

2.2.2. Yüksek enerjili atritörde karıştırma işlemi 15

2.2.3. Sıkıştırma yöntemleri 16

2.3. Metal Tozlarının Sinterlenmesi 19

2.3.1. Sinterleme teorisi 20

2.3.2. Sinterleme atmosferleri ve etkileri 24

Sayfa

3. KOMPOZİT MALZEMELER.....26

3.1. Metal Matrisli Kompozitler(MMK).....27

3.1.1. Matris malzemeleri ve özellikleri.....31

3.1.2. Takviye malzemeleri ve özellikleri.....34

3.2. Metal Matrisli Kompozit Çeşitleri.....39

3.2.1. Parçacık takviyeli kompozit.....39

3.2.2. Sürekli elyaf takviyeli kompozit malzemeler.....41

3.2.3. Kısa elyaf takviyeli kompozit malzemeler.....43

3.2.4. Rasgele düzlemsel yönlendirilmiş kompozitler.....44

3.2.5. Dağlımla mukavemetlendirilmiş kompozit malzemeler.....44

3.3. Metal Matrisli Kompozitlerin Üretim Teknikleri.....45

3.3.1. Sıvı faz üretim yöntemleri.....46

3.3.2. Katı üretim yöntemleri.....48

4. İŞLENEBİLİRLİK VE İŞLENEBİLİRLİĞİ ETKİLEYEN FAKTÖRLER.....51

4.1. İşlenebilirlik.....51

4.1.1. İşlenebilirliğin ölçülmesi.....53

5. METAL KESME MEKANİĞİ.....56

5.1. Talaş Oluşumu.....56

5.2. Talaş Tipleri.....57

5.2.1. Sürekli talaş (Akma talaş).....58

5.2.2. Süreksiz talaş (Kesintili talaş).....59

5.2.3. Yığıntı talaş (YT) (Bulit- Up Edge) (BUE).....60

5.3. Talaş Şekilleri.....61

Sayfa

5.4. Kesme Kuvvetleri 61

5.4.1. Kesme kuvvetlerini etkileyen faktörler 62

5.5. Yüzey Pürüzlüğü 65

5.5.1. İdeal yüzey pürüzlüğü 66

5.5.2. Doğal yüzey pürüzlüğü 67

5.6. Talaş Kaldırmada Isı Oluşumu ve Sıcaklık Dağılımı 68

5.7. Takım Ömrü ve Aşınması 71

5.7.1. Aşınma mekanizmaları 71

5.7.2. Aşınma şekilleri 76

6. TOZ METALURJİ TEKNİĞİYLE ÜRETİLEN METAL MATRİSLİ KOMPOZİT MALZEMELERİN İŞLENEBİLİRLİĞİ 79

7. DENEYSEL ÇALIŞMALAR 83

7.1. Malzeme 83

7.2. Numunelerin Hazırlanması 84

7.2.1. Yüksek enerjili atritörde karıştırma 84

7.2.2. Karışım tozların karakterizasyonu 85

7.2.3. Tozların preslenmesi 85

7.2.4. Sinterleme 87

7.2.5. Yoğunluk Hesaplamaları 88

7.2.6. Sertlik ölçümleri 89

7.2.7. Çapraz kırılma deneyi 89

7.3. İşlenebilirlik Parametrelerinin Belirlenmesi 90

7.3.1. Kesici Uç ve Kater Seçimi 90

Sayfa

7.3.2. Talaşlı işleme deneyleri 92

7.3.3. Numunelerin bağlanması 93

7.3.4. Kesme kuvvetleri ölçümü 93

7.3.5. Yüzey pürüzlülüğü ölçümü 94

7.3.6. Talaş köklerinin hazırlanması ve talaş oluşumunun incelenmesi 94

7.3.7. Yığıntı talaş faktörünün (r) belirlenmesi 95

7.4. Metalografik incelemeler 96

8. SONUÇLAR VE TARTIŞMA 97

8.1. Malzeme 97

8.1.1. Al ve Si_3N_4 boyut analizleri 97

8.1.2. Al ve mekanik karıştırma sonrası tozların biçimi 101

8.1.3. Al ve MMK malzemelerin yoğunlukları 103

8.1.4. Al ve MMK malzemelerin özellikleri (sertlik ve çapraz kırılma mukavemeti) 106

8.2. İşlenebilirlik Özellikleri 107

8.2.1. Al ve kompozit malzemede talaş oluşumu 107

8.2.2. Yüzey pürüzlülüğü 112

8.2.3. Tornalama kuvvetleri 115

8.2.4. Talaş biçimleri 119

9. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 122

KAYNAKLAR 124

ÖZGEÇMİŞ 131

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 3.1. Kompozit malzemelerin uygulama alanları 31

Çizelge 3.2. Kompozit üretiminde kullanılan takviye malzemeleri ve özellikleri 36

Çizelge 3.3. Kompozitlerde kullanılan bazı takviye elemanlarının özellikleri 37

Çizelge 5.1. Kesme kuvvetinin, talaş açısı ve ilerleme miktarıyla değişimi.....64

Çizelge 5.2. Talaş açısının çeşitli malzemelere göre değişimi (yaklaşık olarak) 65

Çizelge 7.1. Matris malzemesi olarak kullanılan alüminyum tozunun özellikleri 83

Çizelge 7.2. α-Si_3N_4 seramik tozunun özellikleri 83

Çizelge 7.3. Karıştırma şartları 84

Çizelge 7.4. Talaşlı işleme parametreleri ve takım geometrisi 92

Çizelge 8.1. Presleme sonrası ham yoğunluk ve sinterleme sonrası yoğunluklar .. 103

Çizelge 8.2. MMK malzemelerin çapraz kırılma mukavemetleri ve sertlik değerleri 107

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 2.1. Elektroliz yolu ile üretimin şematik gösterimi 7

Şekil 2.2. Atomizasyon tekniklerinin şematik gösterimi 11

Şekil 2.3. Gaz atomizasyon ünitesi 12

Şekil 2.4. Su atomizasyonu işlemi 12

Şekil 2.5. Tozların sıkıştırılmasında işlem sırası 14

Şekil 2.6. Yüksek enerjili atritörün şematik görünümü 15

Şekil 2.7. Bilyalar arasında ezilen kompozit tozların şematik görünümü..... 16

Şekil 2.8. Tek yönlü sıkıştırmada yoğunluk dağılımı ve tek yönlü kalıbın şematik gösterimi..... 17

Şekil 2.9. Çift yönlü sıkıştırmada yoğunluk dağılımı ve çift yönlü kalıbın şematik gösterimi 18

Şekil 2.10. İzostatik sıkıştırma 19

Şekil 2.11. Sinterleme esnasında difüzyon oluşumu..... 20

Şekil 2.12. İki küresel parçacığın sinterleme profili 21

Şekil 2.13 Çift küre sinterleme modeli üzerinde gösterilen malzeme transfer mekanizmaları 22

Şekil 2.14. Sinterleme aşamaları 23

Şekil 3.1. Değişik malzeme sınıflarının çalışma sıcaklıkları ve mukavemet/ ağırlık oranlarına göre performans haritaları 29

Şekil 3.2. Matrislerin sıcaklık ve yoğunluk özellikleri 33

Şekil 3.3. Parçacık takviyeli kompozit malzemenin şematik gösterimi..... 40

Şekil 3.4. Sürekli elyaf takviyeli kompozit malzemenin şematik gösterimi..... 42

Şekil 3.5. Kısa fiber takviyeli kompozit malzemenin şematik gösterimi 43

Şekil **Sayfa**

Şekil 3.6. Dağılımla mukavemetlendirilmiş kompozit malzemenin şematik gösterimi.....44

Şekil 3.7. Toz metalurjisi tekniği ile kompozit üretimi akış şeması.....49

Şekil 5.1. Talaş oluşumunda kart modeli ve dik kesmenin şematik gösterimi. 57

Şekil 5.2. Talaş tiplerinin şematik gösterimi.....58

Şekil 5.3. Talaş şekilleri ve işlenebilirlik etkisi. 61

Şekil 5.4. (a) Talaşlı işlemde etki eden talaş alma kuvveti ve kuvvet bileşenleri. (b) Tornalamada iş parçası malzemesi içinde oluşan akma alanı ve iş parçası ile takım temas yüzeyinde oluşan kayma alanı 62

Şekil 5.5. Kesme kuvvetleri ve kesme parametreleri arasında ilişkiler.. 63

Şekil 5.6. (a) talaş derinliğinin kesme kuvveti üzerine etkisi, (b) talaş açısının kesme kuvveti üzerine etkisi.....64

Şekil 5.7. Yuvarlak uçlu bir takım için yüzey pürüzlüğünün ideal modeli. 67

Şekil 5.8. Dik kesme sırasında talaş ve iş parçası arasındaki sıcaklık dağılımı.....69

Şekil 5.9. Kesme hızının talaş kaldırmada oluşan ısı üzerine etkisi (teorik). 70

Şekil 5.10. Tipik aşınma bölgeleri ve temel yük faktörleri.....72

Şekil 5.11. Takım aşınma yüzeyindeki gerilmelerin şematik gösterimi. 73

Şekil 5.12. Metallerin işlenmesinde karşılaşılan temel aşınma mekanizmaları.....74

Şekil 5.13. Torna kaleminde aşınma şekilleri. 77

Şekil 7.1. Yüksek enerjili atritörün şematik gösterimi.....81

Şekil 7.2. Çapraz kırılma numunelerinin preslemede kullanılan kalıp ve zımbalar. .86

Şekil 7.3. Çapraz kırılma numunesinin preslenmesini gösteren şematik resim.. 86

Şekil 7.4. İşlenebilirlik numunelerinin preslemede kullanılan kalıbın şekli ve preslenmiş numunenin ön ve üst görünüşü.....87

Şekil 7.5. Sinterleme fırınının şematik gösterimi.....88

Şekil **Sayfa**

Şekil 7.6. Çapraz kırılma test aparatının şematik gösterimi.....90

Şekil 7.7. Mekanik sıkmalı K10 kesici ucun standart geometrisi ve ölçüleri 91

Şekil 7.8. Mekanik sıkmalı PCD kesici ucun standart geometrisi ve ölçüleri 91

Şekil 7.9. Kater açıları ve ölçüleri.....92

Şekil 7.10. Bağlama aparatına, üretilen malzemelerin yerleştirilmesi.....93

Şekil 7.11. Talaş kökü çıkarmak için kullanılan düzenek.....95

Şekil 8.1. %99,9 saflıktaki Al tozunun toz tane boyut dağılımı 97

Şekil 8.2. % 5 Si_3N_4 içeren kompozit tozunun toz tane boyut dağılımı 98

Şekil 8.3. %10 Si_3N_4 içeren kompozit tozunun toz tene boyut dağılımı.....99

Şekil 8.4. % 15 Si_3N_4 içeren kompozit tozunun toz tane boyut dağılımı..... 100

Şekil 8.5. Al ve karışım tozların toz tane boyutu ortalama değerleri..... 100

Şekil 8.6. Kesme hızına ve takım malzemesine bağlı talaş yığılma faktöründeki değişim..... 111

Şekil 8.7. Kesme hızı ve takım malzemesinin yüzey pürüzlülüğüne etkisi 113

Şekil 8.8. Farklı kesme hızlarında kesici takım malzemesi ve Si_3N_4 miktarının yüzey pürüzlülüğüne etkisi 114

Şekil 8.9. Farklı kesme hızlarında kesici takım malzemesi ve Si_3N_4 miktarının kesme kuvvetine etkisi..... 115

Şekil 8.10. Farklı kesme hızlarında kesici takım malzemesi ve Si_3N_4 miktarının ilerleme kuvvetine etkisi 116

Şekil 8.11. Si_3N_4 miktarı ve kesme hızının K10 takımla işlemede oluşan kesme kuvvetine etkisi 116

Şekil 8.12. Si_3N_4 miktarı ve kesme hızının PCD takımla işlemede oluşan kesme kuvvetine etkisi 117

Şekil 8.13. Si_3N_4 miktarı ve kesme hızının K10 takımla işlemede ilerleme kuvvetine etkisi 117

Şekil **Sayfa**

Şekil 8.14. Si_3N_4 miktarı ve kesme hızının PCD takımla işlemede ilerleme kuvvetine etkisi 118

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim **Sayfa**

Resim 8.1. Al tozların morfolojisi 101

Resim 8.2. %5 Si_3N_4 içeren mekanik karıştırma yapılmış tozların morfolojisi..... 102

Resim 8.3. %10 Si_3N_4 mekanik karıştırma yapılmış tozların morfolojisi..... 102

Resim 8.4. %15 Si_3N_4 mekanik karıştırma yapılmış tozların morfolojisi..... 103

Resim 8.5. Al numunesinin mikroyapısı..... 104

Resim 8.6. Al- % 5 Si_3N_4 kompozit malzemesinin mikroyapısı 105

Resim 8.7. Al- % 10 Si_3N_4 kompozit malzemesinin mikroyapısı 105

Resim 8.8. Al- % 15 Si_3N_4 kompozit malzemesinin mikroyapısı 106

Resim 8.9. 50 m/dak kesme hızında işleme sırasındaki talaş oluşumu..... 109

Resim 8.10. MMK' ların 50 m/dak' da tornalanmasında kullanılan K10 kesicilerin SEM görüntüleri..... 110

Resim 8.11. MMK' ların 50 m/dak' da tornalanmasında kullanılan PCD kesicinin SEM görüntüsü..... 111

Resim 8.12. K10 takım ile işlenmiş MMK malzemelerin talaş biçimleri..... 119

Resim 8.13. PCD takım ile işlenmiş MMK malzemelerin talaş resimleri..... 121

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	**Açıklama**
a	Talaş derinliği (mm)
b	Talaş genişliği (mm)
F_c	Kesme kuvveti (N)
F_f	İlerleme kuvveti (N)
f	İlerleme (mm/dev)
D	Parçacık çapı
MPa	Mega Paskal
GPa	Giga Paskal
P	Boyun yarı çapı
R	Talaş yığılma faktörü
R	Kesici takıma uygulanan talaş kaldırma kuvveti
Ra	Ortalama yüzey pürüzlülüğü, µm
Rz	Pürüzlülük derinliklerinin ortalaması, µm
R (r_e)	Kesici uç yarıçapı
V (Vc)	Kesme hızı (m/dak)
Ø	Kesme açısı
t_o (t)	Talaş kalınlığı
t_c	Oluşan talaş kalınlığı
s	Kesici uç kalınlığı
X	Boyun çapı

Simgeler	Açıklama
α	Takım-talaş açısı
λ	Takım talaş ara yüzeyinde esas sürtünme kuvveti

Kısaltmalar	Açıklama
Al	Alüminyum
Al_2O_3	Alüminyum Oksit (Alümina)
B_2O_3	Bor Oksit
B_4C	Boron Karbür
BY	Buharlaşma-yoğunlaşma
CVD	Kimyasal Buhar Çökertme (Chemical Vapor Deposition)
ÇKM (ÇKD)	Çapraz Kırılma Mukavameti (Çapraz kırılma dayanımı)
HD	Hacim difüzyonu
HIP	Sıcak İzostatik Presleme
MA	Mekanik Alaşımlama
MMK	Metal Matrisli Kompozit
PA	Plastik akış
PAN	Poliakrilonitril
SiC	Silisyum Karbür
SiC_P	Silisyum Karbür parçacık
SiC_w	Silisyum Karbür whiskers
SiO_2	Silisyum Oksit
Si_3N_4	Silisyum Nitrür
TM	Toz Metalurjisi

Kısaltmalar	**Açıklama**
TS	Tane sınır difüzyonu
YT (BUE)	Yığıntı Talaş (Built-up Edge)
YT (BUL)	Yığıntı Tabaka (Built-up Layer)
Y/Ç	Yüksekliğin Çapa oranı
YD	Yüzey difüzyonu
WC	Tungusten Karbür

1.GİRİŞ

Son yıllarda teknolojideki hızlı gelişmeler, geleneksel malzemelere oranla daha üstün özelliklere sahip yeni malzemelerin kullanımı gerekmektedir. Bu nedenle yeni malzemelerin üretilebilmesi için araştırma ve geliştirme faaliyetlerinin daha hızlı bir şekilde geliştirilmesi gerekir. Daha önce yapılan araştırmalarda diğer malzemelerden farklı olarak, üstün niteliklerin çoğunun bir arada toplandığı yeni malzemeler üretilmiştir. Bu malzemelere *Kompozit Malzeme* adı verilmiştir. Kompozit malzemelerin birçok çeşidi üretilmektedir. Fakat üretilen kompozit çeşitleri ve üretme yöntemleri çok olduğundan sınıflandırma gereği duyulmuştur. Bunlar ana matris malzemesine göre isimlendirilmişlerdir. Metal esaslı, Seramik esaslı ve Polimer esaslı olarak genel bir sınıflandırılma yapılmaktadır.

Mühendislik malzemelerin yeni bir sınıfı olan metal matrisli kompozitlerde (MMK), malzemelerin özelliklerini iyileştirmek için metal matris içerisine güçlü seramik takviye elemanları eklenmektedir. Bu tür kompozitler gerek kullanım alanının genişlemesi ve yüksek üretim potansiyeli ve gerekse üretim ekonomisi açısından tercih edilmektedir. En yaygın kullanılan takviye elemanları SiC ve Al_2O_3 fiberleri ve partiküllerdir. Metallerin süneklik ve tokluğu, seramiklerin yüksek mukavemet ve yüksek elastisite modülü özellikleri ile birleştirilmeleri neticesinde son derece önemli mühendislik malzemeleri ortaya çıkmıştır [1, 2]. Ancak üretimde karşılaşılan problemler nedeniyle, özellik ve yöntem geliştirme çalışmaları devam etmektedir [2].

MMK malzemelerin gelişmesinde üretim yöntemleri de büyük rol oynamaktadır. Örneğin; Parçacık takviyeli MMK malzemelerin üretiminde TM yönteminin bir katı hal üretim yöntemi olmasına rağmen döküm gibi sıvı hal yöntemlerine tercih edilmemesinin en önemli sebeplerinden birisi de bu yöntemlerle daha homojen bir yapının kolaylıkla elde edilebilmesidir. Yüksek sıcaklık dayanımı, yapıdaki çökeltiler yerine ince dağılımlı parçacıklarla sağlanmaktadır. Ancak bu yapıyı geleneksel döküm yöntemiyle elde etmek mümkün olmamaktadır. Takviye parçacığının boyu ve hacimsel oranı ile orantılı olan homojen dağılım problemi ile matris parçacık kimyasal tepkimeleri döküm yerine TM metodu ile rahatlıkla

aşılabilmektedir [3].

Toz metalurjisi (TM) yöntemiyle üretilen MMK malzemelerin geniş bir kısmını hafif metal esaslı malzemeler teşkil etmektedir. Hafif metaller yüksek fiziksel ve mekanik özelliklerden dolayı TM endüstrisinde artarak kullanılmaktadır. Ana metal olarak Al ve Al alaşımları kullanımı zamanla artmaktadır. TM yöntemiyle MMK üretiminde kullanılan en yaygın hafif metal olan alüminyum ve alaşımlarının olmasının nedenleri; ağırlık oranlarına göre yüksek dayanımları, korozyon dirençleri gibi üstün özellikleridir. Bununla birlikte alüminyum yüzeyinde oluşan ince fakat karalı oksit tabakasından dolayı bazı sorunlar yaşanmakla birlikte presleme işlemi sayesinde oksit tabakası alüminyum tozunun plastik deformasyonuyla kırılarak, sıvı-faz sinterleme metodu için bile sinterleme işleminde sorun çıkarmayacak uygun bir düzeye indirilebilmektedir [3].

Yumuşak bir metal matris içerisine yüksek mukavemetli bir seramik takviye malzemesi eklenmesiyle daha iyi özelliklere sahip MMK' ler elde edilmesine rağmen, bu MMK' ler henüz otomotiv ve uzay uygulamalarında büyük oranda kullanılamamıştır. Bunun en büyük nedeni, MMK' lerin mali bakımdan üretim ve işlenebilme zorluğudur. Sıkıştırmalı döküm gibi yakın veya net şekilli üretim metotlarında bile, üretimin maliyeti minimuma indirilmesine rağmen, işleme ihtiyacı tamamıyla yok edilememekte ve tasarlanan şekle ve ölçülere getirilmesi için malzemenin işlenmesi gerekmektedir. Bundan dolayı MMK' ler için işlenebilirlik çok önemlidir [4].

MMK' lerin işlenmesi (tornalama, frezeleme, matkapla delme ve vida açma), onların abrasiv özelliklerine bağlı olarak oldukça zordur. Bu malzemelerin yüksek hacimlerde kullanılmasının esas limiti, yüksek abrasiv özelliklerine bağlı olarak işlenmelerinin zorluğu ve yüksek maliyetidir. Bu malzemeler, kesici takımları hızlı bir şekilde aşındırmakta ve maliyeti arttırmaktadırlar. Takımların bu hızlı aşınmasına bağlı olarak, MMK' lerin verimli bir şekilde işlenmesini gerçekleştirecek pahalı elmas takımların dışında bilinen hiçbir takımın olmadığı belirtilmektedir. Partikül takviyeli alüminyum alaşım matrisli kompozitlerin daha yaygın kullanımı, onların

zayıf işlenebilirliklerinden dolayı belirli bir şekilde zorlaşmaktadır. Bu MMK' ler içerdikleri seramik partiküllerden dolayı kesici takımların oldukça hızlı bir şekilde aşınmasına ve dolayısıyla yüksek takım maliyetine neden olmaktadır. Takım maliyetinin artması işleme operasyonlarının maliyetini arttırmaktadır. Bundan dolayı, üretkenliği arttırabilen ve takım maliyetini minimum yapabilen kesme şartlarını bulabilmek için temel işlenebilirlik çalışmalarının yapılması gerekmektedir [4].

2. TOZ METALURJİSİ

Havacılık ve savunma sanayinde hafif ve dayanıklı malzemelere olan ihtiyaç, Toz Metalurjisi (TM) ile üretilen Metal Matrisli Kompozit (MMK) malzemelere olan ilginin son on yılda katlanarak artmasına sebep olmuştur. Çalışmalar ve elde edilen deneyimler, yüksek sıcaklık dayanımının yapıdaki çökeltiler yerine, ince dağılımlı parçacıklarla sağlandığını göstermiştir. Ancak bu yapıyı geleneksel döküm yöntemiyle elde etmek mümkün olmamaktadır. Takviye parçacığının boyu, hacimsel oranı, homojen dağılımındaki problemler ile parçacık- matris kimyasal tepkimeleri, döküm yerine TM teknikleriyle rahatlıkla aşılabilmektedir [5].

Toz metalurjisi (TM), çeşitli metal işleme teknolojileri arasında en farklı üretim tekniğidir. Yüksek kaliteli ve karmaşık parçaların ekonomik olarak üretilebilmesi, toz metalurjisini cazip kılmaktadır. TM farklı boyut, şekil ve paketlenme özelliğine sahip metal tozlarını sağlam, hassas ve yüksek performanslı parçalara dönüştürür. Bu işlem; şekillendirme veya presleme ve daha sonra parçacıkların sinterleme yolu ile ısıl bağlanması basamaklarını içerir. TM nispeten düşük enerji tüketimine, yüksek malzeme kullanımına ve düşük maliyete sahip otomatikleşmiş işlemleri verimlice kullanır. Sahip olunan bu özellikler ile TM verimlilik, enerji ve hammadde gibi günümüz kaygılarını ortadan kaldırır. Bunların sonucu olarak, TM konusu sürekli gelişmekte ve geleneksel metal şekillendirme uygulamalarının yerini almaktadır [6].
Tozların istenilen biçime getirilmesi için presleme yapılır. Presleme aynı zamanda tozları kalıpta sıkıştırmanın yanında, ham yoğunluktaki parçanın içerisindeki gözeneklerin azaltılması ve toz temas yüzeyini arttırmak için de yapılır. Bu sinterleme işlemini kolaylaştırır.

Presleme işlemi oda sıcaklığında, bazen de daha yüksek sıcaklıklarda yapılır. Fakat oda sıcaklığından daha yüksek sıcaklıklarda presleme işlemi, kalıp malzemesinin presleme sıcaklığındaki mukavemet değerleri ile sınırlanmıştır. Sinterleme ile elde edilen parçalara bazen son şekillerini vermek için ilave bir presleme işlem uygulanabilmektedir [3].

Sinterleme işlemi, ergitme olmaksızın kullanılan metal tozunun ergime noktasının altındaki bir sıcaklıkta yapılmaktadır. Kullanılan toz bir karışım ise sinterleme işlemi bu tozlardan en yüksek ergime sıcaklığına sahip olan tozun ergime sıcaklığının altında yapılır [3].

2.1. Metal Tozlarının Üretim Yöntemleri

Metal tozlarının üretilmesinde kullanılan yöntemler, tozların birçok özelliklerini tayin eder. Bu yüzden metal tozlarının üretiminde çok çeşitli üretim yöntemleri mevcuttur. Bu yöntemlerden bazıları şunlardır;

1. Mekanik yöntemler
2. Elektroliz yolu ile üretim
3. Kimyasal yöntemler
4. Atomizasyon yöntemleri

2.1.1. Mekanik yöntemler

Bu yöntemlerde darbe, sıkıştırma ve burma kuvvetleri ile iri ve karmaşık şekilli tozlar üretilir. Bu yöntemlerde en az maliyetle toz üretimi için kayma sistemi az olan kimyasal bağları zayıf, karmaşık şekilli yapıya sahip malzemeler ile çok sert ve kırılgan olan metal alaşımları ve seramikler kullanılır.

<u>Talaş kaldırma</u>

Talaş kaldırma yöntemi ile genelde yüksek karbonlu çelik tozları üretilir. Bu yöntemde oksitlenme, yağlanma, kir tutma ve diğer malzeme hurdaları ile karışarak kirlenme problemi olabilir.

Öğütme

Öğütme işleminde; aşınmaya dayanıklı bilyeler ile birlikte iri taneli toz malzeme öğütücü değirmen içerisine konur. Değirmen döndürülerek sert bilyalar ile toz malzemenin çarpışması sağlanarak iri taneli toz malzemenin daha ince hale gelmesi sağlanır. Bu yöntem ile karmaşık şekilli ve soğuk deformasyon görmüş malzeme tozu üretilir. Metaller arası bileşikler, demir alaşımları, demir-krom, demir-silisyum v.b. gibi kırılgan malzemeler mekanik olarak bilyalı değirmenlerde öğütülürler [6].

Öğütülen malzeme gevrek ise bilyalarla çarpışmanın etkisiyle çok küçük tozlara bölünür. Öğütülen malzeme sünek kaba tozlardan oluşuyorsa, bilyaların çarpışması sonucunda tozlar şekil değiştirerek yassılaşırlar ve ancak aşırı sertleşmesi sonucunda gevrekleşerek daha küçük toz parçalarına bölünebilirler. Öğütme işleminin su, alkol ve heptan gibi bir hidrokarbon sıvı içinde gerçekleştirilmesi öğütme süresinin kısaltmasının yanında daha ince tozlar üretilmesini de sağlar [7].

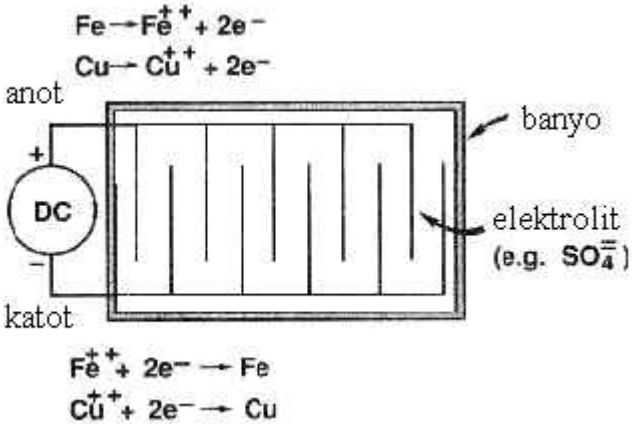
Öğütme işlemleri birçok şekilde yapılmaktadır. Szegvari tipi dikey atritör, yüksek enerjili Spex tipi atritör, Zos tipi yatay atritör, Planetary Mill tipi atritör ve yeni tasarımlı atritörler.

Mekanik alaşımlama

Mekanik alaşımlama (MA) yüksek enerjili atritör kullanılarak yapılan bir düşük sıcaklık sentezleme yöntemidir. Bu yöntemde iki yada daha fazla elementel toz birbiri içerisinde belli oranda karıştırılarak atritör içerisine konur ve mekanik alaşımlama işine tabi tutulur [3]. Genellikle kompozit malzeme tozları üretilir. Bu işlemde amaç değirmen içerisinde bilyelerle metal tozlarının ezilerek, kırılarak ve tekrar kaynaklaşarak yapılan bir kompozit toz işlemidir. İşlem sonunda, metal tozlarını birbirine olabildiğince yedirilerek, istenilen oranlarda kompozit toz kıvamına getirilir [5].

2.1.2. Elektroliz yolu ile üretim

Elektrolitin kimyasal bileşimi ve mukavemeti, sıcaklık, akım yoğunluğu gibi şartları uygunca seçerek, bir çok metal sünger veya toz durumunda katot üzerinde biriktirilebilir (Şekil 2.1). Daha sonraki işlemler olarak, yıkama, kurutma, indirgeme, tavlama ve öğütme gerekli olabilir. Bu yöntemle üretilen metallerin başında bakır gelir, aynı zamanda krom ve magnezyum da bu yöntemle üretilebilir. Elektrolitik tozlar çok saftırlar [6].



Şekil 2.1. Elektroliz yolu ile üretimin şematik gösterimi.

Bu yöntemle demir tozlarını da üretmek mümkün olmakla beraber, maliyetin yüksek olması nedeniyle demir tozu üretiminde diğer yöntemler daha avantajlıdır.

2.1.3. Kimyasal yöntemler

<u>Gaz fazı ayrıştırma yöntemi</u>

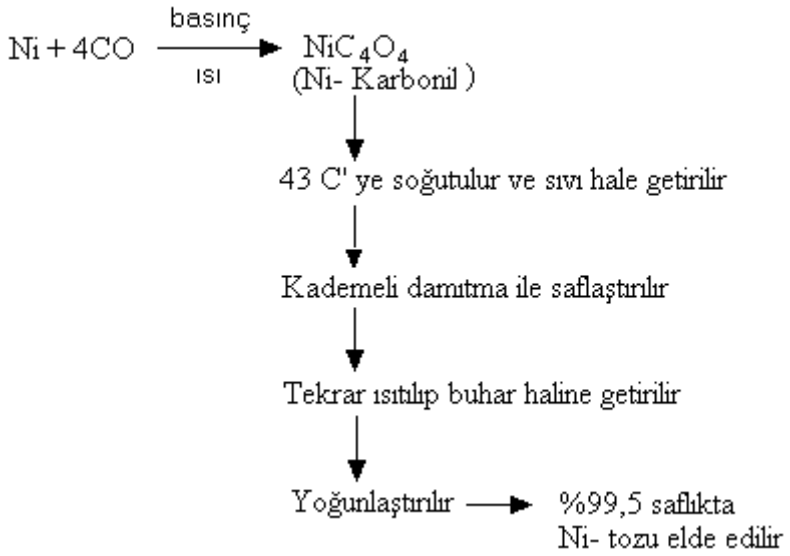
Bu yöntemde (demir, bakır, tungusten, molibden, vb) malzeme oksitleri indirgeyici gazlar (hidrojen veya katı karbon eriyiği) ile indirgenerek metal tozu haline getirilirler. Burada saflık, malzemenin kalitesini belirler. Oksit ve karbonun maliyetinin düşük olması, gözenekli toz imal imkanı, oksit ve parçacık boyutunun kontrolü bu yöntemin avantajı olarak bilinirken, indirgeyici gazların maliyetinin yüksek olması, toz saflığının oksit saflığına bağlı olması, alaşım tozlarının üretim

imkansızlığı bu yöntemin dezavantajı olarak bilinir [8]. Burada kullanılan ham malzemeler süngerimsi yapıda meydana gelen tozların kalitesini belirler [3].

$$FeO_{(k)} + H_{2(g)} \xrightarrow{1000^{o}C} Fe_{(k)} + H_2O_{(g)} \quad \Delta G < 0$$

Termal ayrıştırma

Bu yöntemde demir, nikel ve karbon monoksit gazı etkisinde karbonillerini veren metallerin tozları yüksek saflıkta, düzgün dağılmış ve küresel olarak elde edilirler. Demir, bakır, krom, platin, nikel, kobalt uygun sıcaklıkta CO gazı etkisinde karbonille parçalanan ve tane boyları 2- 10μm olan yeterince ince tane şekilli tozlardır [9].



Sıvı fazdan çökeltme

Metal iyonları içeren, nitratlar, klörürler ve sülfatlar gibi ergiyiklerden daha az asal olan başka bir element ile kimyasal yer değiştirme suretiyle metal tozları üretilir [10]. Aşağıdaki basit denklemle gösterilebilir.

$$\begin{matrix}\text{Nitratlar} \\ \text{Klorürler} + \\ \text{Sülfatlar}\end{matrix} \; H_2O \xrightarrow{\text{Erimiş Tuz}} \begin{matrix}\text{Sıvı fazdan çökelme yapılır.} \\ \text{(Cu, Ni, Co tozları \%99,8 saflıkta elde edilir)}\end{matrix}$$

<u>Gaz fazından çökeltme</u>

Bu yöntem ile genellikle reaktif metal tozları üretilir. Tozu üretilecek malzemenin oksitleri veya klorürleri alınıp gaz fazına geçirilir. Daha sonra çökeltme işlemiyle toz üretilir.

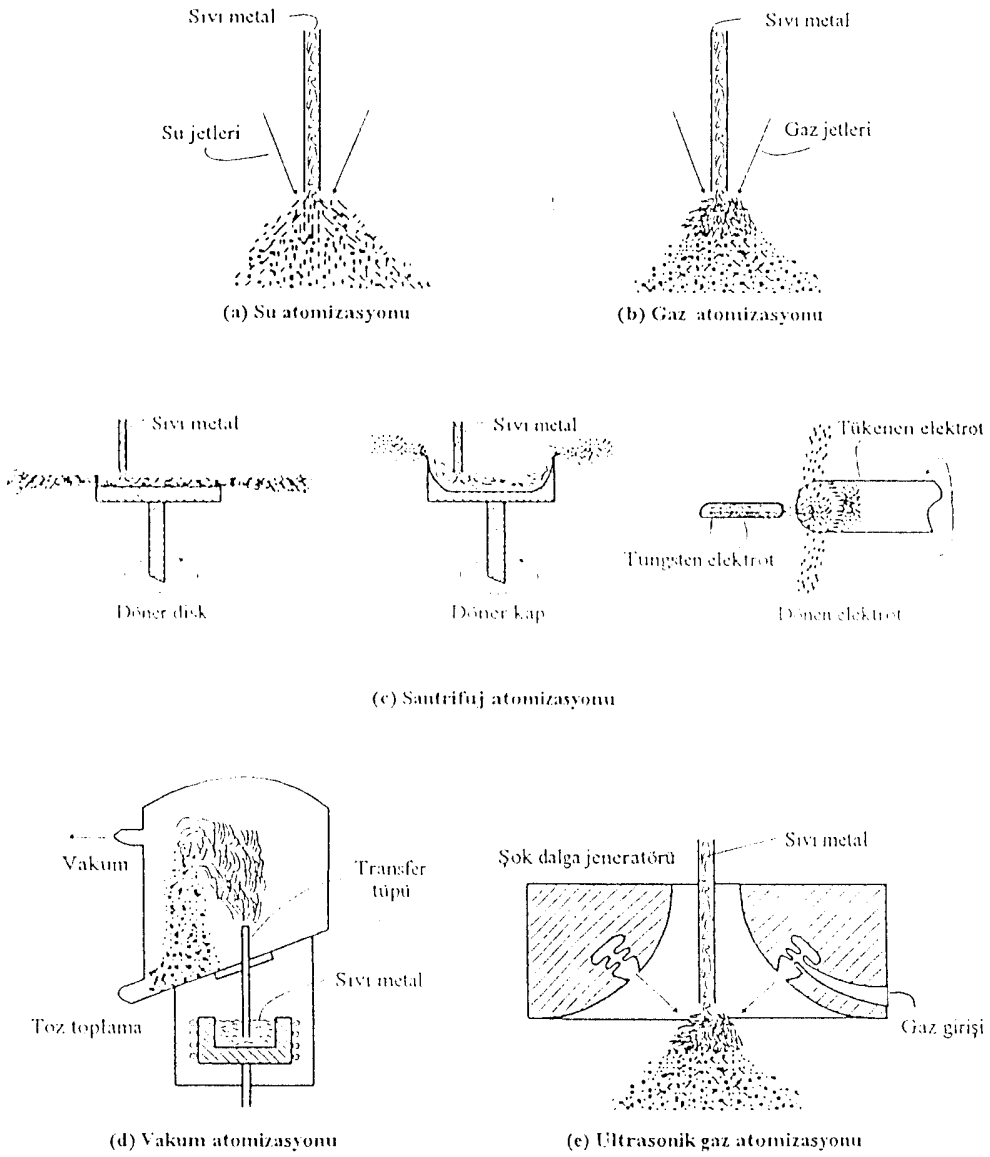
2.1.4. Atomizasyon yöntemleri

Bu işlemde ergimiş metal küçük damlacıklara parçalanır ve damlacıklar birbirleri ile veya katı yüzeyle temasa geçmeden hızlıca soğutulur. Ana fikir, ergimiş metali yüksek enerjili gaz veya sıvı çarpmasına maruz bırakarak sıvı metali daha küçük parçalara ayırmaktır. Hava, azot ve argon en çok kullanılan gazlardır. Su ise sıvılar içinde en çok kullanılandır. Nozulun tasarım ve geometrisi, atomize eden akışkanın basıncı ve hacmi, sıvı metalin akış çapı gibi birçok parametreyi değiştirerek toz boyutu dağılımını kontrol etmek mümkündür. Tanecik şekli ise katılaşma hızı ile belirlenir, düşük soğutma kapasiteli gazlar için küresel şekilden yüksek soğutma kapasiteli su için karmaşık şekle dönüşür. Genelde bu toz üretim metodu ergitilebilen tüm malzemeler için uygulanabilir ve ticari olarak demir, takım çelikleri, alaşımlı çelikler, bakır, pirinç, bronz, alüminyum, kalay, kurşun, çinko ve kadmiyum tozlarının üretilmesinde kullanılır. Krom içeren alaşımlar gibi kolayca oksitlenen metallerde atomizasyon argon gibi asal gazlar yardımıyla gerçekleştirilir. Atomizasyon, alaşımı oluşturan tüm metallerin ergimiş durumda tamamen alaşımlandığı için, özellikle alaşımların toz halinde üretilmesinde faydalı bir yöntemdir. Böylece her toz taneciği aynı kimyasal bileşime sahip olur [6].

Bu yöntemlerde, ergitilmesi mümkün olan her metalde uygulanabildiği gibi saf ve ön alaşımlanmış metal tozlarının doğrudan doğruya ergimiş metalden elde edilmesinde başarıyla kullanılmaktadır. Farklı yöntemler kullanılarak ergimiş metal

alaşımlarından, ergiyiğin sıvı demetini farklı akışkanlar ile ve mekanik kuvvetler kullanılarak sıvı damlacıkları haline getirmek ve daha sonra bunları katılaştırarak toz üretme teknolojisi atomizasyon olarak bilinir (Şekil 2.2) [11]. Mekanik kuvvetler olarak santrifuj (merkez kaç) kuvvetler kullanılır. Farklı akışkanlar ise gaz ve sıvı akışkanlarıdır.

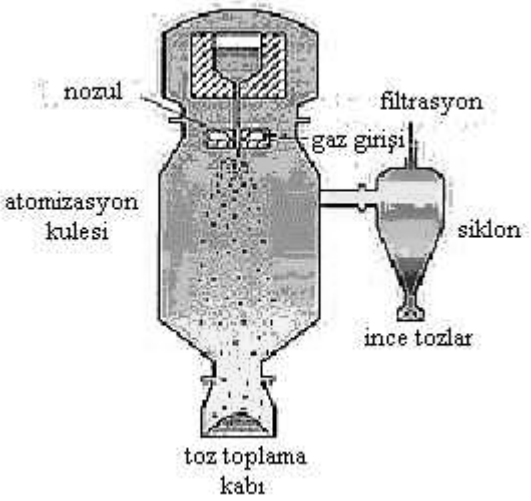
Ayrıca atomizasyon yöntemleri, alüminyum ve alüminyum alaşım tozlarının ticari miktardaki üretimlerinde en yaygın ve en ekonomik olan yöntemlerdir. Ancak Al aşırı reaktif ve yumuşak olmasından dolayı, oksitlenme ve sıvama aşılması gereken temel sorunlar olarak ortaya çıkmaktadır. Kısaca, işlem sırasında değirmeni soğutma, koruyucu atmosfer ve alüminyumun yapışmasını önleyici organik bağlayıcıların kullanılması ile beraber yeni üretim tekniklerinin geliştirilmesi gerekmektedir [5].



Şekil 2.2. Atomizasyon tekniklerinin şematik gösterimi.

Gaz atomizasyonu

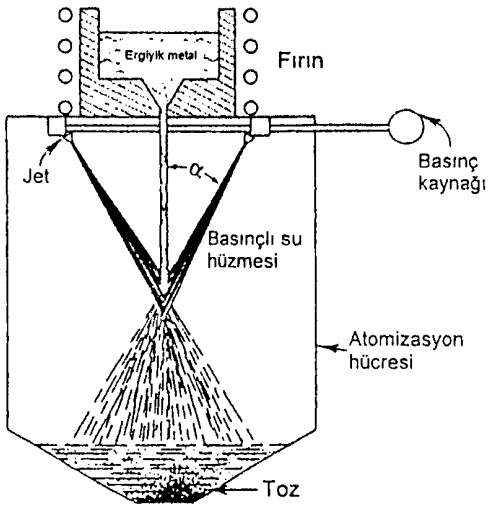
Gaz atomizasyonu ergiyik metal demetine, yüksek basınçlı gazın belli bir açı ile püskürtülerek hüzmenin dağılımı ile sıvı metal damlacıkları elde edilmesi işlemidir. İki yada daha fazla ağızlık, sıvı metalin akma ekseni etrafına eşit açıda yerleştirilir ve gaz hüzmesi ile ergiyik metal demeti bir noktada kesişirler. Bu bölgeye atomize bölgesi denir (Şekil 2.3). Bu yöntemle üretilen tozlar ince küresel ve yüzeyde oksit olmayan tozlar üretilir. Kimyasal saflıkları iyidir [12].



Şekil 2.3. Gaz atomizasyon ünitesi.

Sıvı atomizasyonu

Ergiyik metal akış ekseni etrafında en az iki tane olmak üzere eşit açıda yerleştirilen su jetleri ile kesilir (Şekil 2.4).



Şekil 2.4. Su atomizasyonu ünitesi.

Santrifüj atomizasyonu

Santrifüj yönteminde ergimiş metalin damlacıkları yüksek hızda dönen bir diskten fırlatılırlar. İki çeşit santrifuj atomizasyonu vardır. Bunlardan birinde, bir kap

içindeki ergiyik metal, ergiyik metalin damlacıklara ayrılması için, uygun bir hızda düşey eksen etrafında döndürülür veya bir metal demeti dönen bir disk veya koni üzerine akıtılır. Diğerinde ise, bir metal çubuk yüksek hızda döndürülür ve serbest uçta elektron ışını veya plazma arkı vb. ile ergitilir. Bu ikinci tip işlem, Döner Elektrot Atomizasyonu olarak bilinir ve çubuk düşey veya yatay eksende döndürülebilir. Bu uygulamanın önemli bir üstünlüğü, atmosfer kontrollü bir ortamda, hatta vakumda bile çalışılabilmesi, böylece çok reaktif olan metallere ait temiz tozlar üretmesidir [6].

2.2. Metal Tozlarını Presleme

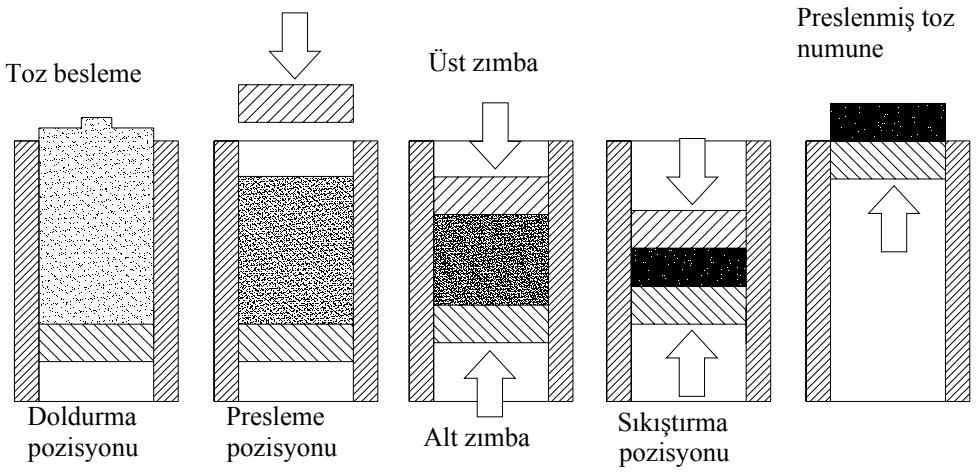
Günümüzde toz metalurji teknolojisiyle metal tozlarını belirli basınçlar altında sıkıştırıp daha sonra da bu sıkıştırılmış kütleleri belirli sıcaklıklarda sinterlemek suretiyle imalatı çok güç olan makine parçalarını dahi elde etmek mümkündür. Presleme işlemi tüm presleme sistemleri için aynı mantıkla çalışır. İlk olarak metal tozu kalıp boşluğuna doldurulur. Daha sonra iki veya daha fazla eksenel hareketli alt ve üst zımba vasıtasıyla istenilen karmaşıklıkta şekle ve oldukça homojen yoğunluk dağılımına sahip olacak şeklinde makine parçaları sıkıştırılır. Bu şekilde elde edilen sıkıştırılmış parça, birbirine göre izafi hareketli dişi kalıp ve alt zımbalar yardımıyla kalıptan çıkartılır [3].

Tozlar aynı şekil ve boyutta olmadığından sıkıştırma öncesi, tozların homojen dağılımlarını elde etmek amacıyla tozlar yağlayıcılarla birlikte belli bir süre karıştırılırlar. Yağlayıcı kullanmanın amacı, tozların şekillendirilmesi sırasında toz kütlelerinin kalıp duvarlarını daha az aşındırması, parçanın kalıptan daha kolay çıkarılması ve toz taneleri arasındaki sürtünmeleri azaltmak suretiyle tozların akışını kolaylaştırmak ve meydana gelecek enerji kayıplarını azaltmaktır. Yağlayıcılar düşük yoğunlukta olduklarından çok az miktarda toza ilave edildiğinde çok büyük bir hacmi işgal edebilir [3, 13].

Şekillendirme sonrası parçanın kalıptan çıkarılması için gerekli olan sıyırma basıncını düşük tutan yağlayıcı iyi bir yağlayıcıdır. Yağlayıcı ve toz optimum bir

sürede karıştırılmalıdır. Fazla karıştırma, düşük ergime derecesine sahip yağlayıcının ısınarak yapışkan bir hal almasına sebep olabileceği gibi, az karıştırma ise yağlayıcıdan beklenen özelliği karışıma yansıtmaz. Bazı yağlayıcılar yapıştırıcı görevi görüp mukavemet artışına sebep olduğu gibi bazıları ise sinterleme esnasında yanarak gözenek artışına sebep olur ve buna bağlı olarak sinterleme ile artması gereken yoğunluk düşebilmektedir [14].

Kalıbın iç yüzeyinde oluşan sürtünme, diğer bütün kuvvetlerden büyüktür. Bu kuvvet kalıbın merkezine doğru azalır. Bu sırada basınçtan dolayı toz parçacıkların yer değiştirmesi esnasında her toz paçacığı, üzerindeki basıncın tesiri ile direncin en az olduğu yöne dolayısıyla daha az yoğun bölgelere kaçma eğilimi gösterir. Böylece kısmen yanlara doğru, fakat daha çok kalıp merkezine doğru bir toz akışının da olduğu anlaşılmaktadır (Şekil 2.5) [3, 15].



Şekil 2.5. Tozların sıkıştırılmasında işlem sırası.

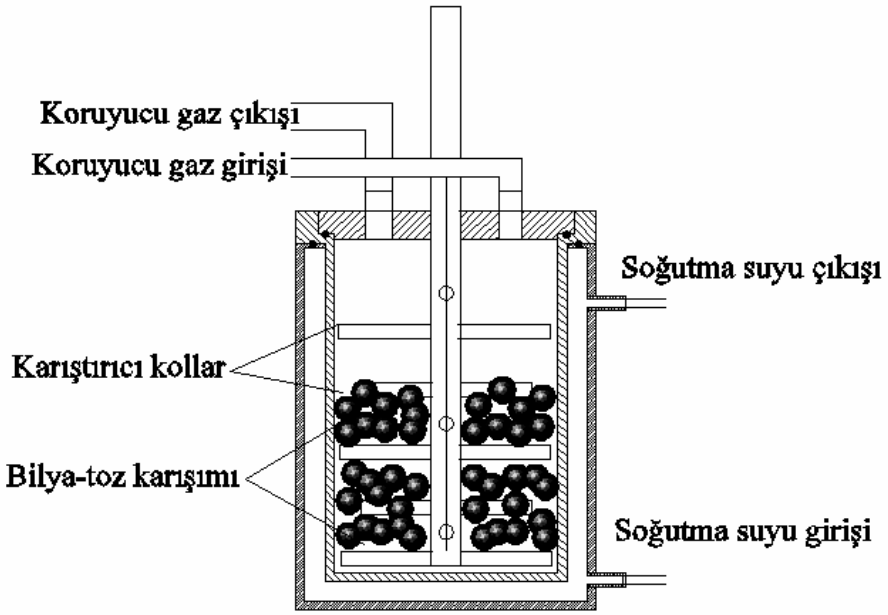
Preslenmiş parçanın tüm yüksekliği göz önüne alınırsa daima basıncın büyüdüğü yönde akıp giden bir yoğunluk düşüşü tespit edilebilir. Tek yönlü preslemelerde parçanın zımbaya en uzak bölgesinde, çift yönlü preslemelerde parçanın orta bölgesinde kötü yoğunluk dağılımı görülür. Preslenmiş bir parçanın yoğunluğundaki istenmeyen bu farklar parça boyu ile direkt alakalıdır. Sıkıştırma mekanizmasının iyi bilinmesi kalıp tasarımındaki parametre ve kriterleri belirleyici yönde bir etkiye sahiptir [3, 15].

2.2.1. Presleme öncesi tozların karıştırılması

Seçilen metal tozları, dengeli homojen karışımı verecek şekilde karıştırılmalı ve bu karışım, kalıbın bütün bölgelerine dolacak akıcılıkta olmalıdır. Bunu başarmak için tozlar hassas bir şekilde tartılmalı, grafit gibi metal olmayan malzeme ile birlikte karıştırıcıya konulmalı ve katı yağlayıcı %0,5 ile %1,5 arasındaki bir oranda olmalıdır. Karıştırma zamanı ve hızı, sonradan gelecek işlemlerdeki malzeme davranışlarına ve üretilen parçanın özelliklerine etki eder. Kalıp aşınmasını en aza indirgemek ve sıkıştırma basıncını azaltmak için yağlayıcıların bütün tanelerle temasta olabilecek şekilde karıştırılması gerekir [6]. Karıştırmanın amacı, farklı yapıdaki malzemelerden isteğe ve ihtiyaca bağlı yeni bir karışım elde edilmesidir.

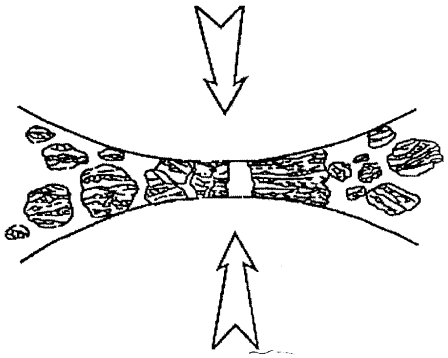
2.2.2. Yüksek enerjili atritörde karıştırma işlemi

Karıştırma işlemi için yüksek enerjili atritör çalıştırıldığında, yüksek bir enerji ile bilyeler birbirine çarpar ve çarpmanın etkisiyle bilyeler arasında kalan tozlar ezilir. (Şekil 2.6) Aynı zamanda sert olan malzeme daha küçük parçalar halinde kırılarak yumuşak matris içerisine gömülür [16].



Şekil 2.6. Yüksek enerjili atritörün şematik görünümü.

Şekil 2.7' de bilyaların çarpışması sonucu ezilen ve birbirine kaynayan tozlar görülmektedir. İşlem devam ettikçe tozlarda pekleşme, soğuk kaynama ve kırılma devam eder. Çok kısa bir sürede dahi karışım elde edilir. Ancak homojen değildir. Artan karıştırma zamanına bağlı olarak katmanlı yapı kaybolur ve homojen bir yapı elde edilir [17].



Şekil 2.7. Bilyalar arasında ezilen kompozit tozların şematik görünümü.

Karıştırma esasında kuru ve katı haldeki tozların birbirine periyodik olarak kaynaklanması ve tekrar bu büyüyen malzemelerin kırılmasını sağlayarak daha ince ve daha homojen bir mikro yapı elde edilmesini sağlayarak, dayanımı yüksek olan kompozit malzemelerin üretilmesinde kullanılır [16].

Karıştırma işleminin istenilen özelliklerde malzeme tozu üretilebilmesi için karıştırma parametrelerinin iyi bilinmesi gerekir. Bu parametreler; karıştırma tipi, karıştırma kabının cinsi, karıştırma işleminin hızı, karıştırma süresi, karıştırıcı bilyaların tipi, ebatı ve ebat dağılımları, bilya toz oranı, karıştırma kabı doluluk oranı, karıştırma ortamı, işlem kontrol kimyasalları ve karıştırma sıcaklığıdır [18].

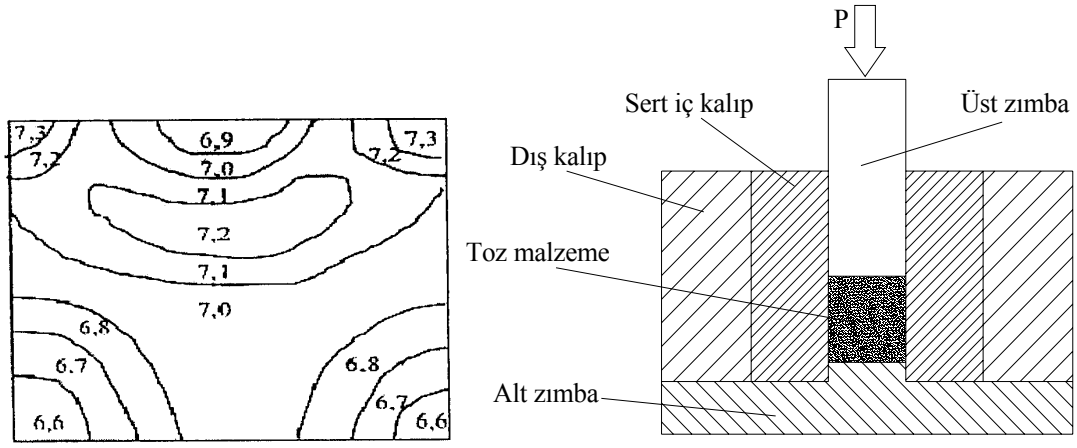
2.2.3. Sıkıştırma yöntemleri

Toz metalurjisi ile üretilen makine parçalarının şekil ve boyu üzerindeki kısıtlamalar sıkıştırma işlemleri ile ilgilidir. Metal tozlarını preslemek için birçok uygun yöntem vardır. Fakat bunlardan çok azı homojen dağılım sağlayabilir. Özellikle kamaşık parçalarda bu daha da zordur [3].

Tek yönlü sıkıştırma

Tek yönlü sıkıştırmada, dikey doğrultuda deformasyonun başlamasıyla, tozlar arası ve toz- kalıp çeperi arasında oluşan sürtünme düzensiz bir basınç dağılımına sebep olmaktadır. Bu sebepten yük, iş parçasına düzenli olarak uygulanmamaktadır. Dolayısıyla iş parçasındaki yoğunluk homojen bir dağılım göstermektedir (Şekil 2.8). Yoğunluk, hareketli zımbaya yakın bölgelerde daha yüksek olmakta ve sabit zımbaya doğru giderek azalmaktadır. Yoğunluktaki bu azalma iş parçasının boy/ çap oranına bağlıdır [3, 14, 19].

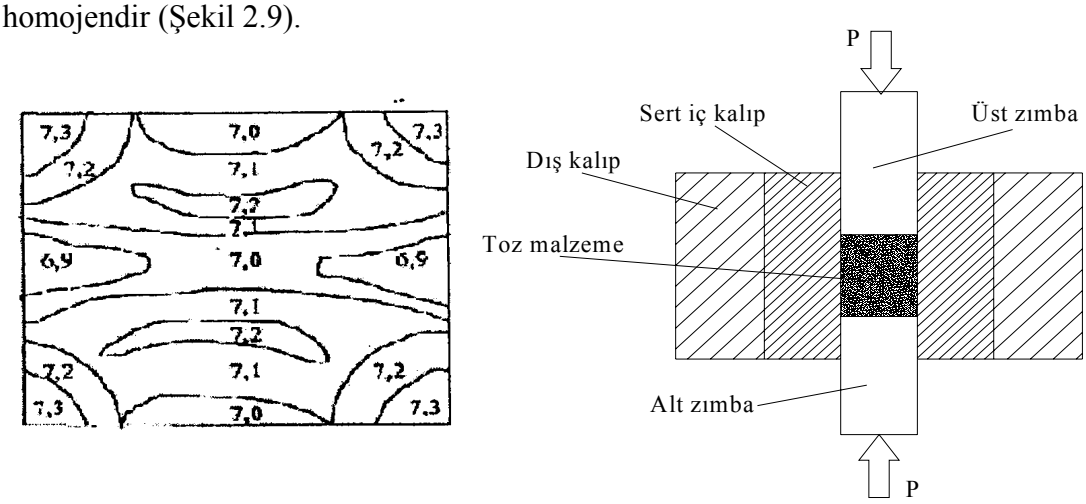
Sürtünmeyi en aza indirmek, üniform bir yoğunlaşma elde etmek ve sıkıştırılabilirliği artırmak için yağlayıcılar kullanılır. En çok kullanılan yağlayıcılar çinko stearat, stearik asit ve asetondur. Kalıp duvarının tozlardan çizilmemesi ve aşınmaması için çok sert olması gerekir. Bundan dolayı genellikle sert metal kalıplar kullanılmaktadır. Diğer önemli faktör ise, yükseklik ve çap arasındaki ilişkidir. Tek eksenli preslemede, başlangıçta kalıba doldurulan toz kütlesindeki yüksekliğin çapa oranı (Y/Ç), presleme sonrası yoğunluk dağılımını direkt etkilediğinden önemlidir. Bundan dolayı bu limitin, Y/Ç ≤ 4 olması önerilmektedir [19].



Şekil 2.8. Tek yönlü sıkıştırmada yoğunluk dağılımı ve tek yönlü kalıbın şematik gösterimi.

Çift yönlü sıkıştırma

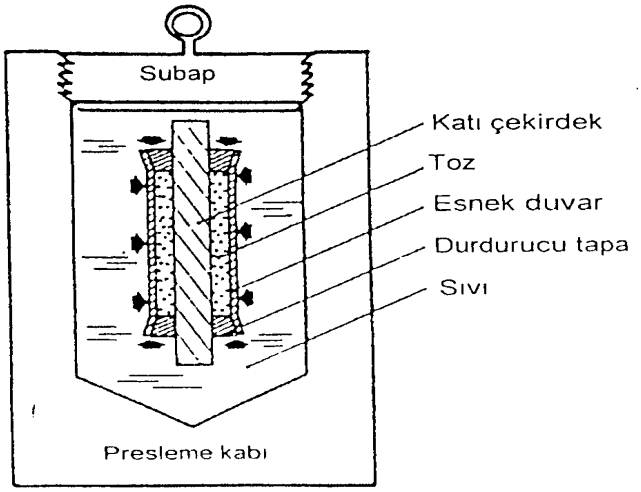
Şekil 2.9' da gösterilen preslemede toz, birbirine zıt yönlü olarak hem alt, hemde üst zımba tarafından aynı anda sıkıştırılmaktadır. Her yönden eşit veya farklı miktarda hareket veya basınç uygulanır. Çift yönlü sıkıştırma ile kalıp içerisinde boydan boya dengeli bir sıkıştırma temin edilir [3]. Bu yöntemde sıkıştırılan parçadaki yoğunluk dağılımı, tek yönlü sıkıştırma ile elde edilen parçaların yoğunluk dağılımından daha homojendir (Şekil 2.9).



Şekil 2.9. Çift yönlü sıkıştırmada yoğunluk dağılımı ve çift yönlü kalıbın şematik gösterimi.

İzostatik sıkıştırma

Basınçların aynı anda her yönden eşit olarak uygulanabildiği tek yöntemdir. Toz kalıp görevi yapan elastik bir kaba konup kapatılır. Yumuşak kalıptaki hava sıkıştırma sırasında çıkacağından önceden boşaltılır. Daha sonra kalıp, akışkan banyosu içindeki bir basınç kabına daldırılır. Akışkana yüksek basınç verilerek kalıp hidrostatik basınç etkisinde bırakılır (Şekil 2.10). Basınç kabından çıkarıldıktan sonra, parçanın üzerindeki yumuşak kalıp alınır ve genellikle bir daha kullanılmaz. Bu yöntemde üretilen toz metal parçalar da daha homojen bir yoğunluk dağılımı elde edilebilir [3, 20]. Sıcak veya soğuk olarak yapılabilir. Bu sistemin dezavantajı ise parçanın verilen boyut toleransı içinde tutulmasının güç olmasıdır.



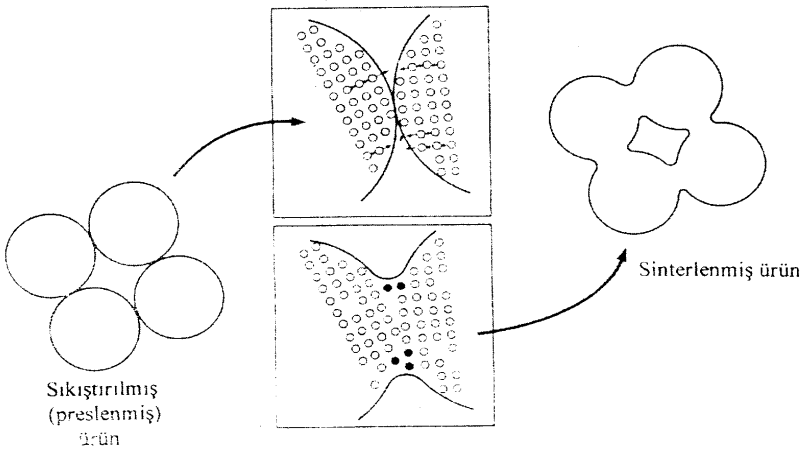
Şekil 2.10. İzostatik sıkıştırma.

2.3. Metal Tozlarının Sinterlenmesi

Sinterleme (pişirme), malzeme tozlarının sıcaklığın etkisiyle birbirlerine difüzyon yoluyla birleşmesini sağlayan ve kademeli bir şekilde tozlar arasındaki gözenek hacmini azaltan bir yüksek sıcaklık işlemidir [21]. Sinterleme sıcaklığı, tek bileşenli sistemlerde metalin ergime sıcaklığının 2/3' ü veya 4/5' i kadar alınır. Çok bileşimli sistemlerde ise sinterleme sıcaklığı ergime derecesi düşük olan metalin altında tespit edilir. Sinterleme sıcaklığı yükseldikçe sinterleme süresi kısalır [22].
Sinterleme, preslenmiş parçalarda önemli etkiler meydana getirir. Bunlar; kimyasal değişme, boyutsal değişme, iç gerilimlerin giderilmesi, toz parçacıklarında değişmeler ve alaşımlamadır.

Toz haline getirilmiş malzeme belli bir şekilde sıkıştırıldığında toz parçacıklar, aralarında önemli miktarda gözenekli olarak, çok yerde birbiri ile temas halindedir. Sınır enerjisini azaltmak için atomlar sınırlara difüz ederler. Tozların birbirine bağlanmasını sağlayarak sonunda gözeneklerin büzülmesine neden olurlar. Sinterleme süresi arttırılırsa gözenekler yok olabilir ve malzemenin yoğunluğu artar [21].

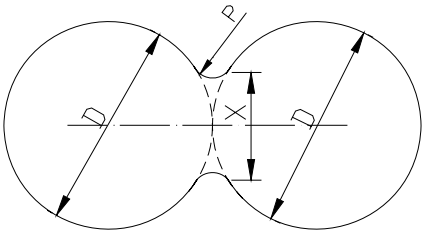
Eğrilik yarıçapı küçük yüzeyler hızla büyür. Temas noktaları en küçük yarı çapa sahiptir ve bu nedenle ilk olarak büyür. Boşluklar, ara yüzeyden uzağa difüz ederken atomlar bu noktalara difüz ederler. Boşlukların net hareketi parçacıkların birbirine yaklaşmasını sağlar (Şekil 2.11). Aynı zamanda gözenek boyutunun azalmasına ve yoğunluk artışına neden olur [21].



Şekil 2.11. Sinterleme esnasında difüzyon oluşumu.

2.3.1. Sinterleme teorisi

Tozların preslenmesinden sonra, küresel şekilli toz parçacıkları noktasal olarak temas halindedirler. Şekil 2.12' de iki küresel parçacığın sinterleme profili verilmiştir. Sinterleme işlemi sırasında, temas eden parçacıklar arasındaki bağlar kuvvetlenir ve kaynaklaşmalar oluşur. Sinterleme işleminde, parçacıklarda önce bir boyun büyümesi ve ilerleyen sinterleme zamanı ile gözeneklerde büzülmeler oluşur. Daha sonra, gözenek kanalları kapanarak gözenekler kapalı gözenek şekline dönüşürler. Şekil 2.14' de sinterleme işlemi sırasında parçacıklar arasındaki bağlarda ve gözeneklerdeki değişimler şematik olarak gösterilmiştir.



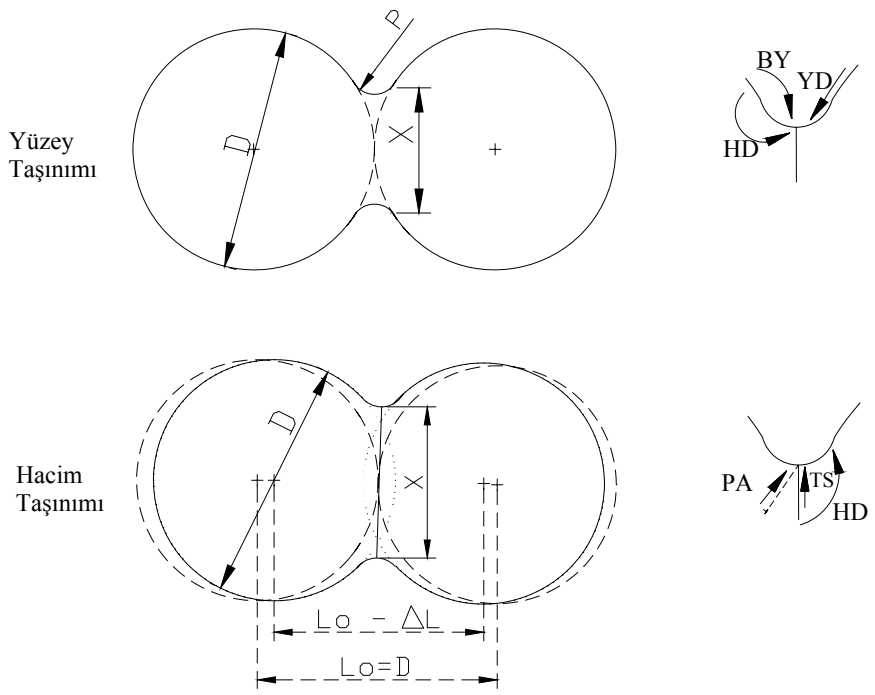
Şekil 2.12. İki küresel parçacığın sinterleme profili (X=boyun çapı, D=küre/parçacık çapı, P=boyun yarıçapı)

Sinterlemenin oluşabilmesi için atomların yeterli yayınmaya sahip olması gerekir. Atomik yayınma 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.

Sinterlemeden önce toz kütlelerinin özelliklerinin bilinmesi önemlidir. Şekillendirme sırasında tozlar deforme olmamışsa Van der Waals bağlarının bir sonucu olarak tanecikler arasında zayıf bağlar oluşur. Preslenmiş parçalarda ise bu durum farklıdır. Özellikle temas bölgelerinde uygulanan basınç, yüzey filmlerinin bozulmasına sebep olur. Böylece sinterlemeden önce, uygulanan basıncın etkisiyle toz parçacıklarının temas ettiği küçük alanlarda oluşan sıkışmaların sonucunda yapışmalar meydana gelir.

Temas halindeki tozların sıcaklığın etkisiyle atomların yayınmasıyla malzeme transferi başlar. Malzeme transferinin mekanizması, harekete geçirici kuvvetlerin kütle akışı meydana getirmesi ile çalışır. Hacim ve yüzey taşınımı olmak üzere iki türlü malzeme transferi vardır(Şekil 2.13). Sinterlemeyi kontrol eden yüzey taşınımı, tane yüzeyinde kütle akışı meydana getirir. Yaygın sinterleme özelliklerinin yüzey taşınımıyla geliştirilmesine rağmen boyutsal değişim olmaz ve yoğunluk sabit kalır. Yüzey taşınımı sırasıyla yüzey difüzyonu ve buharlaşma-yoğunlaşma olmak üzere iki önemli mekanizma yardımcı olur. Yüzey taşınımıyla boyutsal değişim olmaz, fakat sinterlemedeki hacim taşınımı boyutsal değişmeye sebep olmaktadır. Hacim taşınım mekanizması; hacim difüzyonu, tane sınırı difüzyonu, plastik ve viskoz akıyı kapsar. Plastik akının önemsiz olduğu düşünülür. Sinterleme sırasında karşılaşılan

yüzey gerilmesi yeni dislokasyonlar üretmek için yetersiz kalır. Bununla birlikte, elektron mikroskobu ile ince tozlar ısıtılırken, boyun bölgesinde dislokasyon hareketinin meydana geldiği görülmüştür. Her iki taşınım mekanizmasında da blok parça yüzey alanı, boyun büyümesiyle azalmasına rağmen, sinterleme sırasında esas değişiklik yoğunlukta meydana gelir. Genellikle hacim taşınım mekanizması son sinterleme bölgesinde aktiftir. Bu değişik difüzyon mekanizmaları malzemeye, tane boyutuna, sinterleme devresine, sıcaklığa ve diğer bazı işlem parametrelerine bağlıdır.

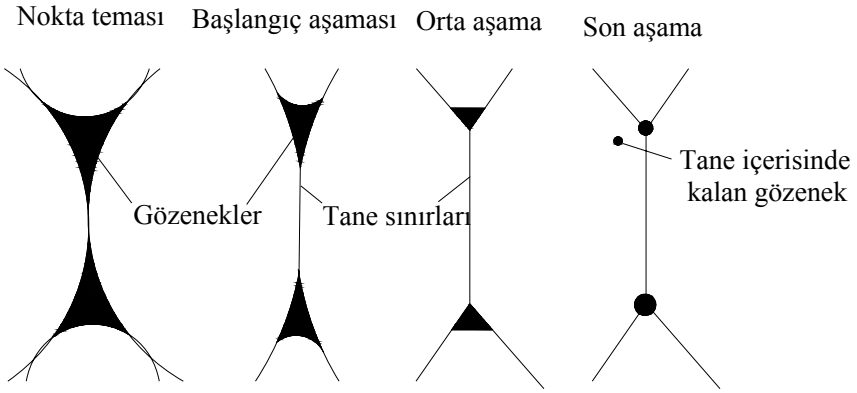


Şekil 2.13 Çift küre sinterleme modeli üzerinde gösterilen malzeme transfer mekanizmaları.

Yüzey taşınım mekanizması, yüzeyde kütle hareketi sağlayarak boyun büyümesi meydana getirir (BY= buharlaşma-yoğunlaşma, YD= yüzey difüzyonu, HD= hacim difüzyonu). Hacim yayınım mekanizmasında ise boyun büyümesinin oluşumu için iç kütle kaynakları kullanılır (PA= plastik akış, TS= tane sınırı difüzyonu, HD= hacim difüzyonu).

Sinterleme üç devrede olabilir. Bunlar: ilk sinterleme devresi, orta sinterleme devresi ve son sinterleme devresidir [20].

İlk sinterleme devresinde; birbirine temas eden tozlar arasında önce bir boyun büyümesi ilerleyen sinterleme süresi ile gözeneklerde büzülme meydana gelir ve gözenek kanalları kapanarak, kapalı gözenek şekline dönüşürler. Boyun bölgesinin içine doğru net bir kütle akışı vardır. Boyun yarıçapının (X/2), parçacık çapına (D) oranının 0,3' den az olduğu kısım sinterlemenin başlangıcının ilk aşaması olarak adlandırılır (Şekil 2.14) [20].



Şekil 2.14. Sinterleme aşamaları.

Orta sinterleme devresinde; hacim ve tane sınırı difüzyonu ile gerçekleşen yoğunluk artışı ve tane büyümesidir. Orta kademede gözenekler, ilk kademeye göre daha düzgün şekillidir ve birbirine bağlı silindirik yapıya sahiptir. Fakat açık gözenekler son sinterleme devresine kadar kalır. Bu durumlarda boyutsal değişim arzu edilmez. Böyle durumlarda yoğunlaşmayı en aza indirgemek için kısa sinterleme zamanı, düşük sinterleme sıcaklığı ve yüksek sıkıştırma basıncı kullanılır.

Orta sinterleme devresinin başlangıcında, gözenekler tane sınırına yerleşmiş durumdadır. İlerleyen sinterleme zamanı ile gözenekler ve tane sınırları arasında bazı etkileşimler meydana gelir. Bu etkileşimler iki tür mekanizmayla oluşur: 1. Tane büyümesi sırasında gözenekler tane sınırı hareketiyle sürüklenir, 2. Tane sınırları, gözeneklerin yerlerinden ayrılması ile bozulur. Sinterleme sıcaklığı arttıkça tane

sınırlarının hareket oranı artar. Gözenekler tane sınırından daha yavaş hareket ettikleri için tane sınırlarından ayrılırlar. Tane içerisindeki gözeneklerin ayrışması sertlik artışına neden olur ve teorik yoğunluk da % 70 ile % 90 arasında değişir (Şekil 2.13). Orta sinterleme devresinin sonucunda, silindirik gözenekler, tane büyümesini yavaşlatmada o kadar etkili olmayan küresel gözeneklere dönüşmeye başlar. Bu da sinterlemenin son aşamasının başlangıcının göstergesidir.

Son sinterleme devresinde; tane sınırlarından ayrılmış ve izole edilmiş kapalı küresel gözeneklerin oluşumu sinterlemenin son devresini tanımlar. Bu küresel gözenekler hacim taşınım mekanizması ile büzülür ve gözeneklilik oranı azalır. Yoğunlukta % 92' yi geçen bir teorik yoğunluk görülür.

2.3.2. Sinterleme atmosferleri ve etkileri

Sinterleme için gerekli bir atmosfer prensip olarak parçaların ve fırının oksitlenmesini önlemek, yüzey oksitlerini indirgemek, fırında buharlaşan yağlayıcı gazlarını dışarı atmak ve demir karbon alaşımlarında olduğu gibi blok parçaların bileşimini kontrol etmek için kullanılır.

Genellikle bu atmosferler endotermik gaz ve kırılmış amonyaktır. Bununla birlikte saf hidrojen ve ekzotermik gazlarda nadir olarak kullanılır [23]. Ne yazık ki her malzemenin sinterlemesinde kullanılacak süper bir gaz yoktur. Bu nedenle, atmosfer seçimi basit gaz sistemlerinden karmaşık gaz sistemlerine kadar çok değişiklikler gösterir. Atmosferin seçimi, sinterlenecek malzemeye göre tespit edilir. En iyi şartları sağlayacak atmosfer seçilirken ekonomiklik ve güvenirlik gibi diğer faktörlerde hesaba katılır. Endüstride kullanılan gazlar şu şekilde sınıflandırılabilir.

1. Yerinde üretim: Bu yöntemde fırının yanına yerleştirilen düzenek yardımıyla atmosfer üretilir. Bu metot ekzotermik, endotermik ve kırılmış amonyak atmosferlerinin üretimi için kullanılır. Ekzotermik atmosfer bir hidrokarbon gazının hava miktarının kontrol edildiği bir refrakter yanma hücresinde yakılmasıyla üretilir.

Endotermik atmosfer ise propan ve doğal gaz gibi hidrokarbonların reaksiyonuyla bir jeneratör içinde üretilir. Endotermik atmosferler daha çok karbon çeliklerinde kullanılır.

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

3. Dubleks sistemler: Sentetik atmosfere çok benzerdir. Tüpte depo edilmiş azot gazı bir veya daha fazla gazla istenen atmosfer bileşimini verecek şekilde karıştırılır. Bu sınıftaki iki temel atmosfer kırılmış amonyakla azot ve endotermik gazla azottur [24].

Sinterlemede kullanılan atmosferler, parçaları oksitlenmekten koruduğu gibi, mevcut oksitleri de indirger ve atmosferin bileşimine göre karbürizasyon veya dekarbonizasyon meydana getirir. Sıcaklık ve son karbon konsantrasyonu karbürizasyon uygulamaları için bilinmesi gerekli parametrelerdir [25]. Eğer karbon miktarı kontrol edilmezse fazla karbon atmosferle reaksiyona girerek kaybedilir veya fazla karbürizasyon meydana gelir. Karbon miktarı, su buharı-hidrojen, karbondioksit-karbon monoksit ve metan-hidrojen oranları ile belirlenir. Uzun sinterleme zamanlarına ve yüksek sinterleme sıcaklıklarına izin verilmezse denge oranları daha iyi olan atmosferler gerekir [26].

3. KOMPOZİT MALZEMELER

Kompozit malzemelerin genel olarak kabul edilmiş bir tanımı olmamakla birlikte en geniş anlamda kompozit malzeme; çok kristalli birden fazla ve farklı, metal ve metal olmayan bileşenlerin bir arada toplanması olarak ifade edilmektedir. Bileşenlerin kompozisyonlarını ve yapısal şeklinin her ikisini de hesaba katan bir tanımlama şu şekilde yapılmaktadır. Bir kompozit malzeme, temel olarak birbiri içerisinde çözünmeyen ve birbirlerinden farklı şekil ve/veya malzeme kompozisyonuna sahip iki veya daha fazla makro bileşenin karışımından veya birleşmesinden oluşan bir malzeme sistemidir [27].

Yukarıdaki tanımlamanın bile aydınlatılmasına ihtiyaç duyulmaktadır. Bazı mühendislik alanlarına göre bu tanımlama oldukça geniştir. Çünkü kaplanmış malzemeler, doldurulmuş plastikler, beton gibi malzemeler kompozit olarak değerlendirilmemesine rağmen bu tanıma göre kompozit malzeme sınıfına girmektedir. Yukarıdaki tanımın bir eksikliği de dağılımla sertleştirilmiş alaşımlar ve sermetler gibi partükül takviyeli kompozitlerin makroskobik seviye değil de mikroskobik seviye sınıfına girmesidir. Sonuç olarak bu tanım kompozit yapı ve kompozit malzemeler arasındaki çizgiyi belirleyememektedir [27].

Aynı zamanda kompozit malzemelerin tanımı şu şekilde yapılmaktadır. İki yada daha fazla sayıdaki, aynı veya farklı gruptaki malzemelerin en iyi özelliklerini, yeni ve tek bir malzemede toplamak amacıyla, makro düzeyde birleştirilmesiyle oluşturulan malzemelerdir [28].

Bir malzemenin kompozit sayılabilmesi için belirli özellikleri taşıması gerekmektedir [29]. Bu özellikler;

1. İnsan yapısı olmalı,
2. En az iki veya daha fazla fiziksel ve mekaniksel özelliği ayrı olan malzemelerin birleştirilmesi ve farklı ara yüzeye sahip olmaları,

3. Herhangi bir ferdi bileşenle elde edilmeyen mekanik özelliklerin gerçekleştirilmesi,

4. Optimum özellikler elde etmek için bir malzemenin diğer malzeme içine kontrollü bir şekilde dağıtılmasıyla iki ayrı malzeme karıştırılarak kompozit bir malzeme oluşturulmalı,

5. Özelliklerin mükemmel olup kompoziti oluşturan elemanların en iyi özelliklerin bir arada toplanması gerekmektedir.

Bir kompozit malzeme bünyesinde, çekirdek olarak adlandırılan takviye elemanı ve bunun etrafını çevreleyen matris malzemesinin bulunduğu bilinmektedir. Takviye elemanı olarak değişik morfolojiye sahip kısa ve uzun elyaflar, whiskersler (kılcal kristaller), kırpılmış veya parçacıklı seramikler kullanılmaktadır. Bunların temel fonksiyonu gelen yükü taşımak ve matrisin rijitlik ve dayanımını arttırmaktır [29].

3.1. Metal Matrisli Kompozitler (MMK)

Metal matrisli kompozitler ana malzemesi metal olan kompozit malzemelerdir. Matris malzemeleri çok çeşitli metal ve metal alaşımı olabilmektedir. Hafif metaller, kompozitler için matris malzemesi olarak çok cazip olmaktadır. Bunlar plastiklerden daha yüksek elastik modül, dayanım ve tokluğa sahip olup yüksek sıcaklıklarda özellikleri de daha iyidir. Ancak MMK üretimi daha zordur. Bunlar her elyafla iyi ara yüzey bağı oluşturamazlar. Metallerle en kolay bağ oluşturan silisyum karbür (SiC) kaplanmış boron elyaftır. Fakat bunlar pahalıdır. MMK' lerde çok yaygın olarak kullanılan matris malzemesi, düşük yoğunluklu, iyi tokluk ve mekanik özelliklere sahip olan hafif metaller ve alaşımlarıdır. Bu hafif metal alaşımları dayanım ve özgül ağırlık oranlarının iyi olması nedeniyle hafif yapı konstrüksiyonlar da tercih edilirler. Atmosfere karşı korozyon dayanımının da çok yüksek olması diğer karakteristik özelliklerden biridir. Genellikle Al, Ti, Mg, Ni, Cu ve Zn matris malzemesi olarak kullanılır. Fakat Al ve alaşımları, Ti ve Mg yaygın olarak kullanılmaktadır [30].

Metal matrisli kompozitlerde takviye sürekli fiber, kısa fiber, parçacık ve/veya partikül ve whiskerler şeklindeki malzemelerdir. Takviye malzemeleri genelde oksit, karbür veya nitrür bileşimindeki malzemelerdir [31]. Metal matrisli kompozit malzemelerin yerlerine kullanıldıkları metal ve diğer bazı malzemelere göre küçümsenmeyecek üstünlükleri mevcuttur. Bu özellikler aşağıda verilmiştir [30];

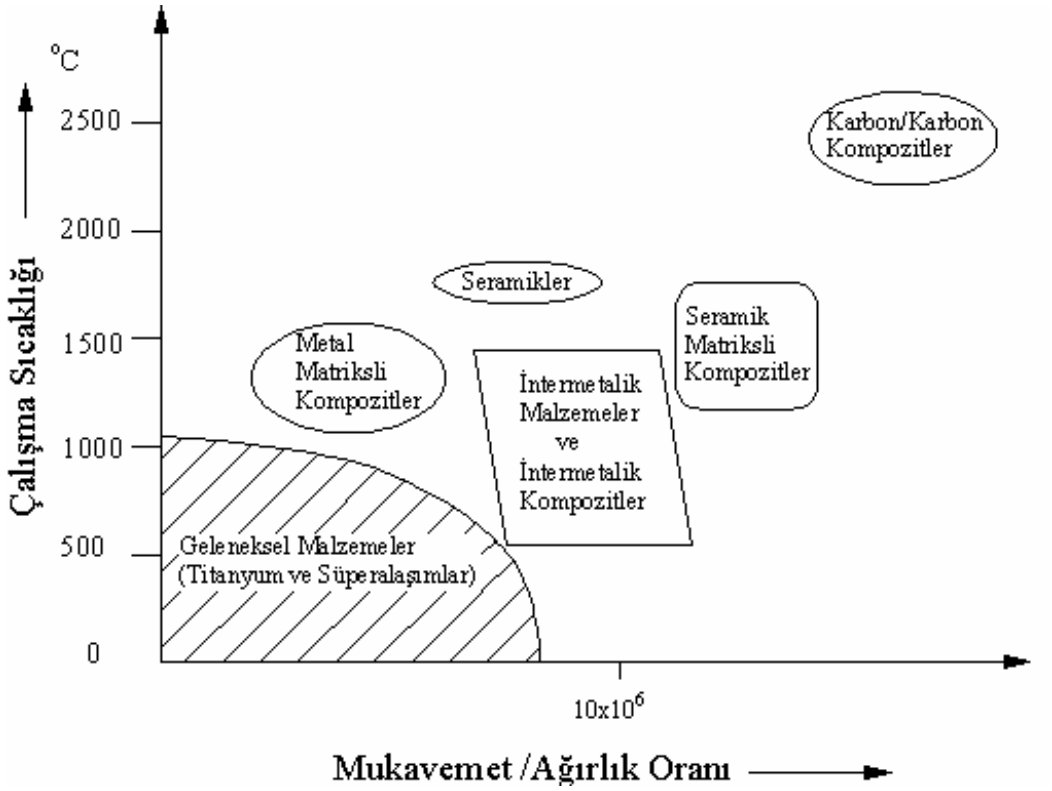
1. Yüksek elastik modüle sahiptirler,
2. Yüksek mukavemet (çekme, basma, aşınma, sürünme ve kayma) gösterirler,
3. Yüksek sıcaklıklarda çalışırlar,
4. Metallerin süneklik ve tokluk, seramiklerin yüksek mukavemet ve yüksek elastik modül özelliklerini birleştirirler,
5. Tekrar üretilebilir mikroyapı ve özelliklere sahiptirler,
6. İyi korozyon direnci,
7. İyi termal ve ısı iletkenlik özellikleri mevcuttur,
8. Düşük yoğunluk değerleri verirler,
9. Çekicilik ve estetik görünüm.

Fakat yukarıda belirtilen bu özellikler için gerekli şartlar, uygun matris ve takviye eleman çifti, üretim tekniği, optimizasyonu, bileşenlerin mukavemet özellikleri ve diğer faktörler göz önüne alınarak üretim yapılırsa istenilen özelliği elde etmek mümkündür. Uygun matris/takviye elemanı seçiminin, sistemin mekanik ve fiziksel özellikleri üzerine etkisi büyüktür. Çünkü kompozit içerisinde matrisler tarafından yükün takviye elemanına iletilmesinde matris ile takviye elemanı arasındaki ara yüzey bağının da kuvvetli olması gerekmektedir. Ara yüzey bağının kuvvetli olması ise bileşenlerin uyumuna ve matrisin ıslatabilirlik özelliğine bağlıdır. Bunun yanında üretim tekniği seçimi dışında takviye elemanlarının matris içerisinde homojen dağılımının da matris alaşım ve takviye elemanı çiftlerinin uygun seçimine bağlıdır. Bu sebepten dolayı en uygun matris ve takviye çifti seçilmelidir [28, 30].

MMK üretiminin esas amacı matris alaşımının mukavemet ve elastik modülünü arttırmaktır. Aynı zamanda matris alaşımları farklılığından dolayı değişik elastik modül, mukavemet ve termal genleşme katsayılı malzemeler üretilebilmektedir. En

önemli özelliklerinden biri ise aşınma dirençlerinin çok iyi olmasından dolayı aşınma uygulamalarında yaygın olarak kullanılabilmektedir [30, 33].

Metal matrisli kompozitlerin değişik malzeme sınıflarının çalışma sıcaklığı ve mukavemet/ağırlık oranlarına göre performans haritaları Şekil 3.1' de görülmektedir [34].



Şekil 3.1. Değişik malzeme sınıflarının çalışma sıcaklıkları ve mukavemet/ ağırlık oranlarına göre performans haritaları [34].

MMK' lerin uygulama alanları; uzay sanayi, makine tasarımı, spor malzemeleri ve eğlence malzemelerinin yanında rijitlik ve hafiflik ile birlikte iyi yorulma direnci sağlamasından dolayı otomobil buji kolları, alüminyum oksit takviyeli alüminyum kompozitlerden basınçlı pres tekniği ile yapılmıştır. Bu kompozitler, yüksek sıcaklık özelliklerinin çok iyi olmasından dolayı otomotiv sanayinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Uçak kanat panelleri SiC_w takviyeli alüminyum matrisli kompozitlerden üretilmiş ve %20- 40 arasında hafiflik sağlanmıştır [4, 35].

MMK' ler ile de uçak çerçevelerinin yapımında benzer avantajlar elde edilmektedir. Kompresör diskleri, pervaneler, vanalar, jet motoru rotorları ve trident füze kılavuz elemanları metal matrisli kompozitlerden başarılı olarak üretilmektedir. Yakın gelecekte metal ve seramik esaslı kompozitlerin jet motorları ve uçak çerçevelerinin üretiminde geleneksel malzemelerin yerini alacağı sanılmaktadır. SiC_P/Al kompozitlerde son yıllarda tenis raketleri ve golf sopalarının yapımında kullanılmakta, motor parçaları ve pistonları da SiC_w/Al kompozitten yapılmaktadır. Karbon elyaf takviyeli kompozitler de oltalar ve tenis raketleri yapımında tercih edilmektedir. MMK' ler diğer mühendislik malzemelerine göre daha yüksek mekanik sönümleme özellikleri nedeniyle uzay mekiği yapımı için de çekici görünmektedir. Titanyum da daha yüksek sıcaklık direnci nedeniyle uçak motorlarında, özellikle kompresör pervanesi ve disklerinde kullanılmaktadır. Magnezyum ise piston, buji kolları ve yaylarda; düşük yoğunluğu, düşük termal uzama katsayısı ve yüksek rijitlik özelliğinden dolayı uçak sanayinde kullanılmaktadır. Ancak karbon elyaf ile alüminyum esaslı kompozitler üretildiğinde işlem sırasında elyafın özelliğini kaybetmesi veya ara yüzey reaksiyonuna uğramasından dolayı bu kompozit üretimi tercih edilmemekte, Mg esaslı kompozit üretimi daha ucuz olduğundan uygulanmaktadır. Ancak ıslatabilirliği iyileştirmek için bazen karbon elyaf kaplanmakta veya Ni, Si kullanılmaktadır (Çizelge 3.1) [4, 35].

Çizelge 3.1. Kompozit malzemelerin uygulama alanları.

Endüstri	Uygulama alanları	Kullanılan kompozit malzemeler
Uçak	Uçak kanatları ve gövdesi, helikopter pervaneleri, iniş ve çıkış kapıları, payandalar, döşeme kirişleri, çerçeveler, vantilatör ve türbin kanatları	B/ Al, SiC_w/ Al, Gr/Al Cam/ epoksi, C/ epoksi B/ epoksi, kevlar/ epoksi Süper alaşımlar
Helikopter	Transmisyon kutusu, kiriş destek yapıtları, itici çubuklar, iniş takımları, Rotor kanatları arkası	Al_2O_3/ Mg, Gr/ Al, Gr/Mg B/ Al, Al_2O_3/Al, SiC_w/ Al SiC_w/ Al, B/ Al, Al_2O_3/Al Gr/ Al, SiC/ Al
Uzay	Uzay yapıtları, antenleri, robot kolları	B/ Al, B/ Mg, Gr/ Mg
Otomotiv	Gövde parçaları, tampon ve çamurluklar, ön ve arka paneller, aks mili, yaylar, itme çubukları ve piston kolları	Kevlar/ epoksi SiC_p/ Al, SiC_w/ Al SiC_w/ Al, B/ Al
Gemi	Gemi teknesi Gemi güvertesi	Kevlar/ epoksi, Cam/ epoksi
Kimya	Borular, basınçlı kaplar ve tanklar	Cam/epoksi,Karbon/epoksi
Spor	Oltalar, golf sopaları, yüzme havuzları, Tenis raketleri, Bisiklet ve motosiklet çerçevesi	B/ epoksi, C/ epoksi B/ Al, Gr/ Al, SiC_w/ Al B/ Al, Gr/ Al, SiC/ Al
Elektrik	Motor fırçaları, kablo ve akü plakaları	Gr/ Cu, Gr/Pb, Al_2O_3/ Pb
Tekstil	Mekikler	B/ Al, C/ Al, SiC/ Al
Tıp	Röntgen masaları, Protezler ve tekerlekli sandalye	SiC/ Al, B/ Al B/ Al, SiC/ Al
Uçak- uzay	Uçak frenleri, türbin pervaneleri, Roket çıkış sistemleri	Karbon/ karbon kompozit
Diğer alanlar	Makine yatakları	C/ Pb, Al_2O_3/ Pb

3.1.1. Matris malzemeleri ve özellikleri

Metal matrisli kompozit malzemelerin üretiminde matris malzemesi olarak çok değişik metal ve metal alaşımları kullanılmaktadır. Matris olarak davranan metal, bağlantı elemanıdır. Matrisin asıl fonksiyonu, kompozite uygulanan yükü takviye malzemesine iletmek veya dağıtmaktır [1].

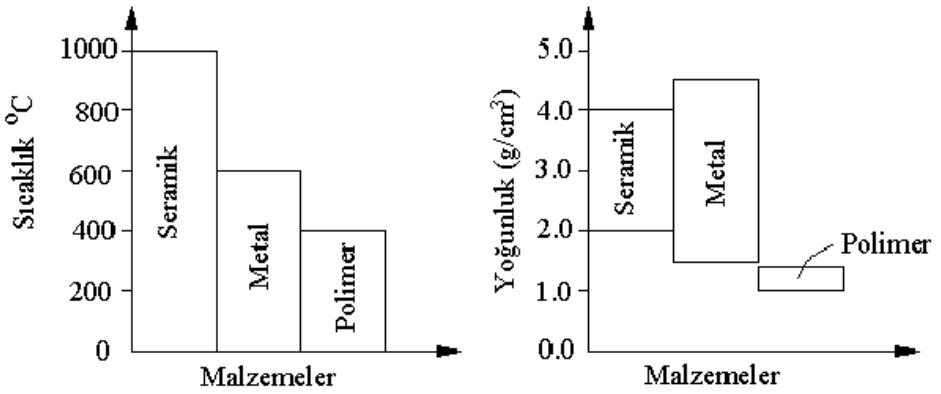
Yüksek performanslı kompozit malzeme üretimi için matris malzemesi elyaflar arasına emdirilmeli, elyafları ıslatabilmeli, kimyasal veya belli şartlarda yapışma için bağ oluşturulmalı, mümkün olan düşük basınç ve sıcaklıkta hızlı şekilde katılaşma yapılabilmelidir. Bağdan ayrı olarak da üretim esnasında veya bundan sonraki işlemler sırasında matris ve elyaf arasında diğer kimyasal etkileşimler olmamalı ve matris zamanla karalı kalmalıdır. Üretim sırasında matrisin kimyası nedeniyle elyaflarda herhangi bir fiziksel hasara maruz kalmamalıdır. Kompozitin sıcaklık etkileşimi ve neme karşı direnci öncelikle matris tarafından belirlenir, ardından takviye elemanı da sıcaklığa karşı kararlı olmalıdır [28].

Kompozitte kullanılan uygun matris seçimi ile birçok önemli fonksiyonlar yerine getirilir. Kompozitlerde kullanılan farklı matris malzemelerinin sıcaklık-yoğunluk özellikleri ve karşılaştırması Şekil 3.2' de gösterilmiştir. Ancak parçacıklı kompozit malzemelerde matrisin görevi sınırlı kalmaktadır. Matris, parçacıkları bir arada tutarken elyaf takviyeli kompozitlerde ise matrisin yerine getirmesi gereken başlıca fonksiyonları şöyle sıralanabilir [3].

1. Düzenlenmiş elyafları bir arada tutarak kuvvetleri elyafa iletmektir. Bu özellikle çekme ve basma yüklemeleri için hayati önem taşır.

2. Elyafları çevresel etkilerden ve darbelerden korumaktır. Cam-elyaf takviyeli kompozitlerde kullanılan çoğu matrisler suya ve korozyona karşı çok hassastırlar. Bazı matrisler üretim sırasında elyaflarla reaksiyona girerler. Bu yüzden matris seçimi kadar elyaf seçimi de önemlidir.

3. Çatlakları durdurmaktır. Kullanılan elyaflar genellikle yüksek dayanımlı, elastik modülü yüksek ancak çok gevrektirler. Matris, elyaflar ayrı ayrı birim içindeyken bunlar kırılma oluncaya kadar bağımsız olarak yük taşıyıcı gibi davranırlar. Bu yüzden herhangi bir çatlak ani kırılmaya sebep olmaz. Örnek olarak bir elyaf kırılırsa bitişik elyafa geçmeden önce matrise transfer olur. Bu nedenle matrisin ve matris elyaf arasında ara yüzey bağının kompozitin tokluğu üzerine önemli etkisi bulunmaktadır. Bu gereksinimlerin çoğunu karşılayan en kolay malzemeler ya hafif metaller ve alaşımları yada termosetlerdir.



Şekil 3.2. Matrislerin sıcaklık ve yoğunluk özellikleri [30].

Al ve Al alaşımları

MMK üretiminde kullanılan matris alaşımları çok çeşitli olabilmektedir. Fakat alüminyum ve alaşımları bu konuda ilk sırayı almaktadır. Bu alaşımların tercih edilmelerinin nedeni düşük yoğunluk ve ergime derecesine sahip olmalarıdır. Birçok seramik takviye malzemesini nispi olarak kolay ıslatabilmektedir [36].

Alüminyumun özgül ağırlığı düşük ve alaşımları yapı çeliklerinden daha fazla mukavemetlendirilmişlerdir. Alüminyum iyi elektriksel ve ısıl iletkenliğe ve yüksek ısı iletme ve ışık yansıtma özelliklerine sahiptir. Pek çok hizmet şartlarında korozyon direnci oldukça iyi ve zehirsizdir. Alüminyum dökülebilir ve pek çok şekle getirilebilir [21].

Bunlarla birlikte saf alüminyum, oksijene olan yüksek afinitesinden dolayı döküm kabiliyetinin kötü oluşu, talaşlı imalatta işlenebilirliğinin iyi olmaması ve kaynakla birleştirmenin güçlüğü gibi problemler oluşturmaktadır [28].

Alüminyum matrisli kompozitler hakkında pek çok araştırma çoğunlukla, havacılık uygulamalarında kullanılan sürekli fiber takviyeli yüksek performans kompozitleri üzerinde yoğunlaşmıştır. Bununla birlikte son yıllardaki trend, fabrikasyonu ve işlenmesi daha kolay ve çok daha ucuz olan parçacık takviyeli kompozitler yönünde

gelişmektedir. Bu kompozitler sürekli fiber takviyeli kompozitler kadar olmasa da klasik malzemelerle kıyaslandıklarında çok daha iyi özelliklere sahiptirler. Alümina ve silisyum karbür, alüminyum matris kompozitlerde en çok kullanılan parçacık takviye elemanlarıdır. Alüminyum ile fiziksel ve kimyasal olarak birleşebilir olmasından dolayı alüminanın Al matris için en ideal takviye elemanı olduğu konusunda yaygın bir kanaat vardır. Bununla birlikte bu iki bileşenin kombinasyonu sistemin ıslatma özelliklerinden dolayı karmaşıktır. Bu problem bakır, magnezyum, demir ve çinko içeren al alaşımları kullanılarak çözülmüştür. Alümina pek çok geçiş metal oksidiyle mineral spinel, $MgAl_2O_4$, ile benzer yapıda olan alüminatlar oluşturacak şekilde hemen reaksiyona girer. Birkaç araştırmacı spinellerin veya benzer oksitlerin metaller ve seramiklerle güçlü bağlar oluşturma potansiyellerinden dolayı ara yüzey bağlarının geliştirilmesinde kullanabileceklerini belirtmişlerdir [37].

3.1.2. Takviye malzemeleri ve özellikleri

Metal matrisli kompozit malzemelerin üretiminde değişik takviye malzemeleri kullanılmaktadır. Kompozit malzemelerden beklenen özelliklerin elde edilmesi için takviye malzemesinin seçimi önemli bir konudur. Takviye elemanı seçimi ve özelliklerin iyi bilinmesi gerekir. Aranan temel özellikler; yüksek modül ve dayanım, düşük yoğunluk, kimyasal uyumluluk, üretim kolaylığı, ısıl direnç gibi kriterlere göre incelenip seçilmektedir [28].

Bununla beraber metal ve seramik matrisli kompozitlerin takviye elemanı seçiminde, fiberlerin yüksek sıcaklıklarda dayanımlarını muhafaza etmeleri, takviye elemanının kimyası, morfolojisi, mikro yapısı ve fiziksel özellikleri yanında maliyet gibi diğer önemli faktörlerinde dikkate alınması gerekir [28].

Metal matrisli kompozitler için kullanılan takviye elemanları; partiküller, sürekli ve süreksiz(kısa) fiberler, whiskersler ve benzerleridir.

Yapısal uygulamalarda kullanılacak olan kompozitin düşük yoğunluklu ve yüksek mukavemetli olması istenir. Kompozit yoğunluğunun düşük olması için de takviye

malzemesinin yoğunluğunun düşük olması gerekmektedir. Partikül şekli de önemlidir. Köşeli partiküller yerel gerilimi arttırıcı olarak etki edebilecekleri için kompozitin sünekliğini düşürür. Bu nedenlerden dolayı kompozit malzeme üretiminde kullanılacak takviye fazının yoğunluğu, partikül şekli ve mukavemeti önemli hale gelmektedir [38, 39].

Üretim yöntemine bağlı olarak takviye fazının seçimi önemli bir konudur. Sıvı faz üretim yöntemlerinde üretim sıcaklığının yüksek olması, matris ve takviye fazı arasında reaksiyonlar meydana getirmektedir. Üretim süresinin uzun olması ara yüzeyde meydana gelen etkileşimi arttırmaktadır. Ara yüzeydeki reaksiyonlar sonucu meydana gelen fazların özellikleri kompozit malzemelerin mekanik özelliklerini doğrudan etkilemektedir. Eğer kompozit malzeme sıvı faz üretim yöntemleri ile üretilecekse takviye fazının matris alaşımıyla etkileşimi önemlidir ve bu etkileşime bağlı olarak takviye malzemesi seçilmektedir [38].

Takviye elemanı seçimindeki bir diğer önemli etken, kompozit malzemenin maliyetidir. Ticari olarak üretilen kompozit malzemelerde maliyetin minimum olması istenmektedir. Birçok uygulamalarda takviye elemanı olarak parçacık maliyetlerinin fiberlere göre daha düşük olması nedeniyle tercih edilmektedir [38].

Kompozit malzemelerde iki yada daha fazla sayıda farklı elemana sahip malzemeler bir araya geldiğinde, malzemelerden beklenen özelliklerin gerçekleşebilmesi için elemanlar arasında belirli fiziksel ve kimyasal uyumun olması gerekir. Matris ile takviye elemanı arasındaki fiziksel uyum, süneklik ve ısıl genleşme özellikleri ile ilgilidir.

Kimyasal uyum ise, ara yüzey bağı ve ara yüzey reaksiyonları açısından önem taşır. Takviye elemanı ve matrisin ısıl genleşme katsayıları arasındaki uyum, kalıcı yapısal gerilim oluşması yönünden önemlidir (Çizelge 3.2) [40].

Çizelge 3.2. Kompozit üretiminde kullanılan takviye malzemeleri ve özellikleri.

Takviye Malzemesi	Yoğunluk ($x\ 10^{-3}\ kgm^{-3}$)	Genleşme ($10^{-6}\ ^oC$)	Mukavemet (MPa)	Elastik Modül (GPa)
Al_2O_3	3.98	7.92	221 (1090°C)	379 (1090°C)
AlN	3.26	4.84	2069 (24 ^{o}C)	310 (1090 ^{o}C)
BeO	3.01	7.38	24 (1090 ^{o}C)	190 (1090 ^{o}C)
B_4C	2.52	6.08	2759 (24 ^{o}C)	448 (24 ^{o}C)
C	2.18	-1.44	-	690
CeO_2	7.13	12.42	589 (24 ^{o}C)	185 (24 ^{o}C)
HfC	12.2	6.66	-	317 (24 ^{o}C)
MgO	3.58	11.61	41 (1090 ^{o}C)	317 (1090 ^{o}C)
$MoSi_2$	6.31	8.91	276 (1090 ^{o}C)	276 (1260 ^{o}C)
Mo_2C	8.90	5.81	-	228 24 ^{o}C)
NbC	7.60	6.84	-	338 (24 ^{o}C)
Si	2.33	3.06	-	112
SiC	3.21	5.40	-	324 (1090 ^{o}C)
Si_3N_4	3.18	1.44	-	207
SiO_2	2.66	<1.08	-	73
TaC	13.90	6.46	-	366 (24 ^{o}C)
$TaSi_2$	-	10.80	-	338 (1260 ^{o}C)
ThO_2	9.86	9.54	193 (1090 ^{o}C)	200 (1090 ^{o}C)
TiB_2	4.50	8.28	-	414 (1090 ^{o}C)
TiC	4.93	7.60	55 (1090 ^{o}C)	269 (24 ^{o}C)
UO_2	40.96	9.54	-	172 (1090 ^{o}C)
VC	5.77	7.16	-	434 (24 ^{o}C)
WC	15.93	5.09	-	669 (24 ^{o}C)
WSi_2	9.40	9.00	-	248 (1090 ^{o}C)
ZrB_2	6.09	8.28	-	503 (24 ^{o}C)
ZrC	6.73	6.66	90 (1090 ^{o}C)	359 (24 ^{o}C)
ZrO_2	5.89	12.01	83 (1090 ^{o}C)	132 (1090 ^{o}C)

Takviye elemanı, kompoziti oluşturan en önemli elemanlardan biri olup, kompozit üzerine gelen yükün büyük bir bölümünü taşımaktadır. Bu sebeple ara yüzey bağının güçlü olması gerekir. MMK' lerde en yaygın olarak kullanılan seramik takviye elemanları Çizelge 3.3' de gösterilmiştir.

Çizelge 3.3. Kompozitlerde kullanılan bazı takviye elemanlarının özellikleri.

Fiber tipi	Çap (μm)	Yoğunluk (Kg/ m^3)	Elastikiyet modülü (GPa)	Çekme dayanımı (GPa)
Saffil (δ-Alümina)	3	3300	300	2.0
FP (α- Alümina)	20	3950	380	1.7
Silisyum karbür	13	3200	390	2.0
Boron	100- 200	2600	390	3.4
SiC Kaplı Boron	100- 200	2600	400	2.9
Y.Dayanımlı Karbon	8	1950	358	2.2
Y. Modüllü Karbon	6.8	1800	235	2.6

Silisyum karbürler (SiC)

Silisyum karbür fiberlerin oksidasyon direnci, yüksek sıcaklıklarda mukavemet ve rijitliği koruma özelliği bor fiberlerden daha iyidir. Erimiş alüminyumun SiC fiberler üzerindeki etkisi de bor fiberlere göre çok düşüktür. Bu nedenle alüminyum matrislerin takviyelendirilmesinde kullanılan bor flamentleri SiC kaplanır. SiC fiberlerin yanında metal matrisli kompozitlerde de SiC whiskersler de kullanılır. SiC whiskerslerle üretilen kompozitlerin önemli bir avantajı, ekstrüzyon, haddeleme, kalıpta dövme ve presleme gibi plastik şekil verme tekniklerinin, whiskerslerde mekaniksel bir hasar meydana getirmeden uygulanabilmesidir [28].

Boron

Boron geleneksel çekme işlemleri için aşırı kırılgan ve reaktiftir. Boron fiberler kimyasal buhar çökertme (CVD) yöntemi ile üretilmektedir. 0,002 cm çapında çok ince, ısıtılmış tungsten flament, yalıtılmış ısıtma çemberi içerisinden geçirilerek bir alt katman olarak kullanılmaktadır. BCl_2 gibi buharlaştırılmış boron bileşikleri çember içerisine verilir, ayrıştırılır ve tungsten tel üzerine boronun çökelmesi sağlanır. Son fiber çapı 25μm- 200μm arasındadır [41].

Boron fiberler, mukavemet ve elastikiyet modüllü özelliklerinin yüksek olması istenilen kompozitlerin üretiminde kullanılırlar. Çekme ve basmaya karşı çok

dayanıklı olup yüksek elastikiyet modülüne sahiptir. Metal matrisler arasında en çok alüminyum matris ile birlikte kullanılırlar. Boron fiberler alüminyum ve titanyum ile kompozit oluşturduklarında sıcaklık altında çabuk tepki verir. Alüminyum matrisli kompozitlerin imalatında yüksek sıcaklık kullanıldığında boron fiberler üzerindeki difüzyonu engelleyen tabaka ortadan kalkar [42].

Boron ticari olarak silisyum karbür (SiC) ve boron karbür (B_4C) olarak üretilir. İki katmanlı olan silisyum karbür fiberde silisyum karbür' ün kalınlığı 2,5 μm civarındadır ve sıcak presleme esnasında metal matris ile boron' un kimyasal reaksiyona girmesini önler [42].

Karbon ve grafit fiberler

Yaklaşık 7,6 μm çapındaki karbon fiberler, ince ve sürekli şekilde kolaylıkla çekilebilen ve sarılabilen organik bir flamentin karbürlenmesi veya ısı etkisi ile eritilerek üretilmektedir. Ön malzeme olarak bilinen organik flament genellikle naylon, poliakrilonitril (PAN) veya zifttir (farklı aromatik organik bileşiklerdir). Yüksek sıcaklıklar, karbon hariç diğer elementlerin giderilmesine neden olacak şekilde organik polimerlerin ayrışmasını sağlar. Karbonlama sıcaklığı 1000 ^{o}C' den 3000 ^{o}C' ye kadar yükseltilirken, elastik modül artarken çekme dayanımı azalmaktadır [41].

Karbon ve grafit fiberler, düşük yoğunluklu, yüksek mukavemet ve modüllü, ısıl kararlılıkları ve dirençleri yüksek olan takviye elemanlarıdır. Bu nedenle çok yaygın olarak kullanılırlar [4].

Alümina (Alüminyum oksit)

Metal matrisli kompozitlerde seramik takviye elemanları da kullanılır. Seramikler içinde en yaygın olarak kullanılan alüminadır. Alümina fiberler iki farklı allotropik formda bulunabilir. Bunlardan birincisi FP sınıfı α- alüminadır. Alümina parçacıkları

sürekli bir çamurlama işlemiyle %99 α- alüminadan imal edilirler. Alümina fiberler, tane boyutu 0,5 μm olup, çok kristallidir ve ortalama çapı 20 μm olan sürekli fiber olarakta kullanılır. Ergime sıcaklıkları 2045 ^{o}C olup yüksek sıcaklıklardaki imalat teknikleri için uygun özelliklere sahiptir [3, 40].

FP α- alümina fiberler maliyetinin yüksek oluşu nedeniyle istenilen derecede uygulamaya geçilememiştir. Bunun ICI Mond Division firması kısa fiber formunda üretilen ve saffil olarakta bilinen RF sınıfı yeni bir alüminayı piyasaya sürmüştür. RF sınıfı bu saffiller, içinde δ- alümina fazı baskın olan çok kristalli yapıdan oluşur. Saffiller %3- 4 SiO_2' i içerir. Yapıda bulunan bu SiO_2 δ fazlı yapıyı düzenler ve alüminyum alaşımı matris ile arasındaki bağı kuvvetlendirir. Bunun yanında saffilin esas yapıyı %96- 97 Al_2O_3'tır. Bu saffil fiberler oldukça kalitelidir [3, 40].

3.2. Metal Matrisli Kompozit Çeşitleri

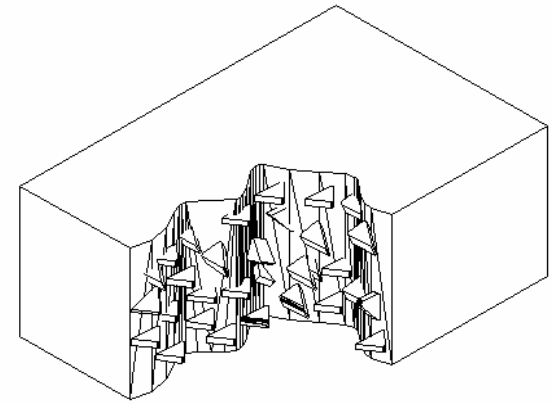
Metal matrisli kompozitleri takviye elemanlarına göre beş ana guruba ayırabiliriz.

1. Parçacık takviyeli kompozitler
2. Sürekli elyaf takviyeli kompozit malzemeler
3. Kısa elyaf takviyeli
4. Rasgele düzlemsel yönlendirilmiş takviyeli
5. Serpiştirme ile güçlendirilmiş metal matris kompozitler

3.2.1. Parçacık takviyeli kompozit

Parçacık takviyeli kompozit malzemelerde, belirgin üniform olarak dağılmış sert, gevrek malzeme yumuşak daha sünek bir matrisle kuşatılmıştır [39]. Parçacık takviyeli kompozitler tek veya iki boyutlu makroskobik partiküllerin veya sıfır boyutlu olarak kabul edilen mikroskobik partiküllerin matris ile oluşturdukları malzemelerdir. En çok kullanılan parçacıklar ise Al_2O_3 ve SiC' den oluşan seramiklerdir. Burada yük, elyaf ve matris tarafından birlikte taşınır ve özellikler

yine izotropiktir (Şekil 3.3) [28, 43]. Bu kompozitler dayanımını iyileştirmekten ziyade alışılmışın dışında birleştirilmiş özellikler elde etmek için tasarlanmaktadır [28].



Şekil 3.3. Parçacık takviyeli kompozit malzemenin şematik gösterimi.

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

- Katı yüzey enerjisinin artırılması
- Sıvı metal yüzey geriliminin azaltılması
- Katı ve sıvı ara yüzey enerjisinin azaltılması gibi parametreler üzerinde durulması gerekir [28, 43].

Bu nedenle de, parçacık yüzeyine kaplama yapılması ve ısıl işlem uygulanması veya matris bileşiminin ayarlanması gibi metotlar uygulanmaktadır. Metal matrisli kompozitlerde ıslanabilirliği iyileştirebilmek için genellikle magnezyum elementi kullanılmaktadır. Bu şekilde bu kompozitin dayanımı;

1. Parçacıkların büyüklüğüne,
2. Parçacıklar arası mesafe ve homojen dağılıma,
3. Matris özelliklerine,
4. Parçacıkların özelliklerine bağlı olarak değişir [28, 35, 43].

Parçacık takviyeli kompozitlerde artan takviye elemanı ilavesi ile birlikte yapı içerisinde porozite vb. hatalar artmaktadır. Dolayısı ile haddeleme gibi ikinci bir işlem de uygulanabilmektedir. Bütün bunlara rağmen döküm metodu ile yapılan bir kompozitin dayanımı, takviye elemanının matris içerisinde homojen dağılamaması ve tane büyüklüğü etkisi nedeniyle toz metalurji metodu ile yapılan kompozitten daha düşüktür. Paçacık takviyeli kompozitin özellikleri, kompoziti oluşturan bileşenlerin özelliklerine ve oranlarına bağlıdır [28].

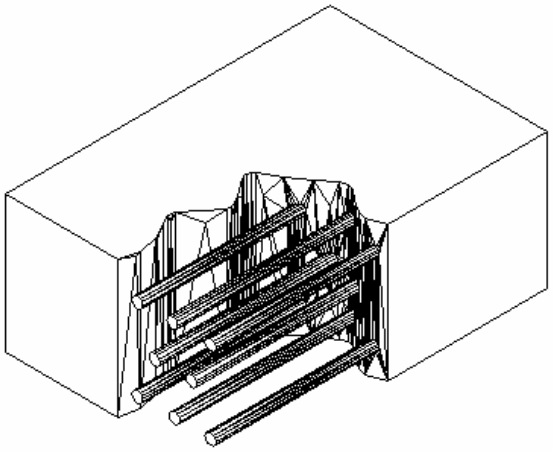
Sementit karbürler veya sermetler metal matris içerisine dağılmış sert seramik parçacıklar içermektedir. Talaş kaldırma işlemlerinde kesici takım olarak kullanılan tungsten karbür takviyeli kompozitler, bu guruba tipik örnektir. Tungsten karbür (WC) aşırı derecede sert olup su verilmiş ve temperlenmiş çelikleri kesebilmektedir. Bu karbür, işleme sırasında toleransları dar tutabilecek kadar yüksek rijitliğe ve çok yüksek ergime sıcaklığına sahiptir. Bu yüzden hızlı işleme sırasında oluşan yüksek ısı problem oluşturmamaktadır. Ne yazık ki tungsten karbürden yapılmış takımlar aşırı derecede kırılgandır. Tokluğu iyileştirmek için tungsten karbür parçacıkları, kobalt tozları ile karıştırılır [41].

3.2.2. Sürekli elyaf takviyeli kompozit malzemeler

Sürekli fiber takviyeli kompozitler, ön şekil verilmiş takviyelere veya tel dizinlerin sıvı emdirilmesi veya ön şekil verilmiş takviye-ana malzeme difüzyonu yoluyla üretilirler. Bu işlemler birçok adımlardan oluşmakta ve otomasyonu zordur. Boyutları ve şekli, standart mekanik işlemler ve mekanik yöntemlerle ikincil işlemlere uygun değildir veya sınırlıdır. Ayrıca bu malzemelerin üretim maliyetleri yüksektir. Bu yüksek maliyet özellikle askeri ve uzay endüstrisinde üstün özelliklerin istendiği durumlarda daha az önem taşımaktadır. Sürekli fiber takviyeli kompozitlerin üretimi oldukça karmaşık ve pahalı olmasına rağmen özellikle birkaç uygulama için uzay endüstrisinde vazgeçilmez malzemelerdir. Fiber takviyeli Al MMK malzemelerin birçok özelliklerinin geliştirilmiş olması ile dikkatler bu yöne çevrilmiştir. Karbon, bor, SiC ve Al_2O_3 sürekli fiber takviyeli kompozit malzemelerde kullanılan takviye elemanlarının en çok tercih edilenleridir. Sürekli

fiberler ile takviye edilmiş Ti matris kompozitler Al alaşımları için çok yüksek olan sıcaklık uygulamalarında kullanılmaktadır [32].

Bu tip kompozitlerde takviye fazı %80 hacim oranına kadar 10 – 200 μm sürekli elyaflardan üretilir. Ancak kullanıldığı yere göre tek flamentler halinde kullanılırlar. Flamentler kimyasal buharlaştırma ve fiziksel buharlaştırma metodu ile kaplama yapılarak üretilir. İlk üretilen sürekli elyaflar boron ve SiC olmasına rağmen daha sonra karbon, alümina esaslı karbonlar da sürekli elyaf olarak üretilmektedir. Sürekli elyaf takviyeli kompozitlerde elyaflar uzun ve tek boyutludur ve elyaf kuvvetleri taşırken matriste kuvvetleri elyaflara iletir. Genelde elyaf, kompozit içinde yönlendirildiği için kompozitin mekanik özellikleri anizotropiktir. Sürekli elyaflar yönlendirme özelliklerinden dolayı diğer takviye elemanlarına göre daha üstün özelliklere sahiptirler. Kompozitin kullanıldığı yer ve üzerine gelen yükleme durumuna göre çekme, basma ve eğilme gerilimleri için istenilen dayanıma ulaşılabilir. Tek yönde çekme dayanıma maruz kalan bölgelerde yönlendirilmiş uzun elyaflar nedeniyle elyaf doğrultusunda maksimum performans gösterirler. Ancak elyaf eksenine dik doğrultuda düşük özellikler elde edilir. Şekil 3.4‘ de sürekli elyafların dizilişleri verilmiştir [28].

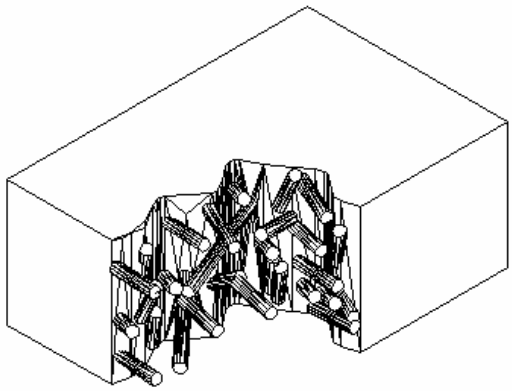


Şekil 3.4. Sürekli elyaf takviyeli kompozit malzemenin şematik gösterimi.

3.2.3. Kısa elyaf takviyeli kompozit malzemeler

Kısa elyaf olarak adlandırılan elyaflar yaklaşık 3- 5μm çapında ve 0,5- 6mm uzunluğunda üretilirler. Bu elyafla takviyelendirilen kompozitler, takviye elemanının ergiyik içinde takviye malzemesi ile birleştirilmesi için, sıkıştırmalı döküm yöntemi ile ön şekil verilmiş takviye malzemesine basınçlı olarak ergiyik matris malzemesi emdirilir. Eriyik içinde takviye elemanının hacim oranı, aslında sıvının viskozitesinin yükselmesi ile sınırlı kalmaktadır. Ön şekil verilmiş elyaflara elyaflara sıvı metal emdirilirken hacim oranları önem arz ettiğinden elyaf oranı yaklaşık % 33 civarında olup bu değerin üzerine çıkıldığında istenilen özellikleri elde etmek zorlaşmaktadır [28].

Sürekli elyaflara göre kısa elyaflı kompozitlerde üretim işleminin hızlı ve maliyetinin düşük oluşu ve şekil verme yeteneğinin yüksek olması nedeniyle tercih edilirler [28]. Şekil 3.5' de değişik kısa elyafların dizilişleri verilmiştir.



Şekil 3.5. Kısa fiber takviyeli kompozit malzemenin şematik gösterimi.

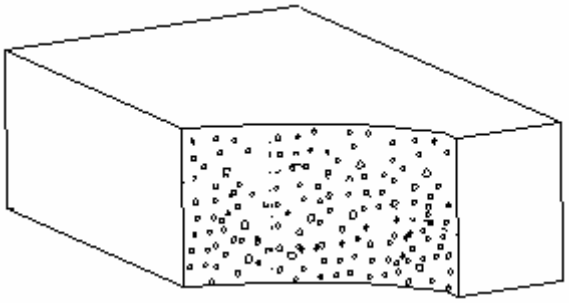
Sürekli elyaf takviyeli kompozitlere göre, kısa elyaf takviyeli kompozitler üretim işleminin hızlı ve düşük maliyetli oluşu, biçimlendirme ve şekil verme yeteneğinin yüksek olması sebepleri ile tercih edilmektedir. Kullanım alanları otomotiv sektöründe yaygın olup, diğer alanlarda kullanılmaktadır.

3.2.4. Rasgele düzlemsel yönlendirilmiş kompozitler

Bu kompozitler de kısa elyaflardan oluşur fakat elyaflar matris içinde rasgele iki boyutlu olarak yönlendirilmektedir. Ön biçimlendirilmiş elyaflar genellikle gelişi güzel veya iki boyutlu yerleştirilerek yönlendirilir. Bu tür üretim yöntemlerinde ön şekillendirilmiş takviyelerin arasındaki dar alanlar ve küçük oyuklar gibi belli kısımlara yerleştirilip emdirilmesine müsaade etmesi ile üretim maliyetini düşürür. Bundan dolayı bu sıvı metal emdirme tekniği diğer tekniklerle karşılaştırıldığında daha cazip görünmektedir. Ancak yönlendirme açısı, yer değiştirme akış alanına, işlem durumuna ve bunlarla birlikte elyafların boyuna, hacim oranına ve kalıbın şekline bağlıdır [28].

3.2.5. Dağılımla mukavemetlendirilmiş kompozit malzemeler

Bu tür kompozitlerde yüksek ısıl kararlılığa sahip mikrondan daha küçük çökeltiler veya parçacıkların metalik matris içinde homojen dağılmasıyla elde edilir (Şekil 3.6). Bu parçacıkların çapı 0,01μm ile 0,1μm ve uzunluğu 50- 200μm arasındadır. Kullanılan parçacıkların hacim oranı %1- 15 arasında değişir [28].



Şekil 3.6. Dağılımla mukavemetlendirilmiş kompozit malzemenin şematik gösterimi.

Yüksek oranda izotropik özellikler gösteren kompozit malzemelerdir. Metalik malzemelerin sertliklerini, aşınma dirençlerini, yüksek sıcaklıktaki mekanik özelliklerini geliştirmek için değişik türde oksit, karbür veya nitrür parçacıklarından

faydalanılır. Bu fazlar metalik matris içerisinde dağıtılır. Tungsten karbür, titanyum karbür, krom karbür, bor karbür ve silisyum karbür gibi karbürlerin tipik özellikleri, yüksek sertlik ve aşınma dirençleridir. Parçacık boyutları, hacim oranları, parçacıklar arası mesafe, matris içerisindeki dağılım homojenliği, çözünürlükleri ve ısıl kararlılıkları kompozit malzemelerin özelliklerini belirleyen esas faktörlerdir [44].
Kompozit oluşturulması esnasında katılan partiküllerin boyutları ve hacim oranları arasındaki fark, mekanik özellikleri de etkilemektedir. Dağılımla sertleştirilmiş alaşımlarda ikinci fazın etkisi dislokasyon hareketlerini engellemesi şeklindedir [44]. Yapı içerisinde partiküllerin boyutu artıkça kompozitin mukavemeti düşer. Parçacık boyutu parçacıklar arası mesafeyi belirlediğinden aynı hacim oranında parçacık boyutu küçük olursa parçacıklar dislokasyon hareketlerini daha etkili olarak kontrol edeceğinden kompozitin dayanımı artar [28].

Kompozit malzemelerde karbürler (SiC, B_4C), nitrürler (Si_3N_4, AlN), oksitler (Al_2O_3, SiO_2) ve elementel malzemeler (C, Si) takviye elemanları olarak kullanılırlar. Bu tür takviye elemanlarından SiC, alüminyum ve magnezyum alaşımlarının tümünde takviye elemanları olarak kullanılmaktadır.

Bu tür kompozitlerde matris içerisindeki homojen karışımdan emin olmak için, mekanik karıştırma, elektro manyetik veya gaz karıştırma ile metal-seramik birlikte karıştırılabilir. Özellikle de yarı katı (hamur) karıştırma metodu, basınçlı döküm ve yeniden döküm işlemlerinde ilginç özellik gelişimleri görülmüştür. Ayrıca bu yöntemlerle metal-seramik parçacık arasındaki reaksiyonlar azalmaktadır [81].

3.3. Metal Matrisli Kompozitlerin Üretim Teknikleri

Metal matrisli kompozitlerin üretim metotları temelde iki guruba ayrılmaktadır.

1. Sıvı faz üretim yöntemleri
2. Katı faz üretim yöntemleri

Sıvı faz ve katı faz üretim yöntemleri konusunda bugüne değin sayısız üretim tekniği geliştirilmiştir. Geleneksel üretim yöntemlerinin modifikasyonu ile MMK malzemeler üretmeyi amaçlayan firmalar ve araştırmacılar çok sayıda yeni yöntemler geliştirmiş olduğundan araştırmacılar tarafından standart üretim metotlarının sınıflandırılması mümkün olmamıştır [45].

3.3.1. Sıvı faz üretim yöntemleri

Sıvı inflitrasyon yöntemi

MMK malzemelerin üretilmesi için kullanılan değişik döküm yöntemlerinden biridir. Sürekli fiberler ve kısa fiber takviyeli kompozitlerin üretilmesinde kullanılır. Bu işlemde esas prensip, bir kap veya tüp içerisine yerleştirilmiş elyaflar arasına sıvı haldeki metal matrisin enjekte edilmesidir [3, 40].

İlk işlem olarak istenilen profilde ön şekillendirme yapılır. Fiberlerin yönlendirilmesi ve hacim oranı bu aşamada ayarlanır. Ön şekiller kalıp içerisinde bir bağlayıcı ile tutturulduktan sonra kalıp içerisine erimiş metal emdirilir ve katılaşmaya bırakılır. Ergimiş metalin emdirilmesi fiber hacim oranının yüksek olduğu durumlarda biraz daha zordur. Fiberler arası mesafenin az olduğu bu gibi durumlarda ergimiş metal ya basınç altında veya vakumla emdirilir [3, 40].

İnflitrasyon işleminin vakum altında yapılması kompozitin kalitesini arttırdığından dolayı bu tip üretim tekniklerinin en iyisi olarak bilinir. Bu yöntemde MMK üretilmesinde karşılaşılan en önemli dezavantajlar;

- Birbirine çok yakın olan fiberlerden dolayı çok küçük boşluklara metalin nüfuz edememesi,
- Fiber- matris ara yüzeyinde metaller arası bileşiklerin oluşması,
- Bazı durumlarda fiberlerin matriste homojen dağılımlarının bozulması sıvı matris fiberleri iyi bir şekilde ıslatmadığında fiber- matris arasında güçlü bir bağ oluşturulamamasıdır [46].

Sıkıştırmalı döküm

MMK malzemelerin üretilmesinde sıkıştırmalı döküm tekniğinin en önemli ve en pratik yöntemlerden birisi olduğu bilinmektedir. Sıkıştırmalı döküm yöntemi, herhangi bir metalin basınç altında katılaşmasına dayanmaktadır. Bu yöntemle hemen hemen her tipte takviye malzemesi kullanılarak MMK malzeme üretilmesinin mümkün olduğu ifade edilmektedir. Bu noktada takviye malzemesi bir kalıp içerisine yerleştirilerek sıvı haldeki metal belli bir sıcaklığa istenilen takviye malzemesi (partikül, fiber) üzerine dökülmektedir. Takiben katılaşma tamamlanıncaya kadar sıvı metal üzerine yüksek miktarlarda basınç uygulanmaktadır. Basınç altında karıştırma; takviye malzemesi ile matris metali arasında ara yüzey bağ mukavemetinin oldukça olumlu yönde etkilendiği rapor edilmektedir [47].

Metal matrisli kompozitlerin üretiminde en yaygın olarak kullanılan takviye elemanı matris çiftleri Al_2O_3- Al, C- Mg ve SiC- Al' dur [28].

İnflitrasyon yönteminde kullanılan basınç miktarı, sıkıştırmalı dökümde kullanılan basınçtan daha düşüktür. İnflitrasyon, diğer anlamda sıvı metalin fiberler arasına sokulmasının, mümkün olabilecek en kısa sürede tamamlanması gerekmektedir. Bu da ancak dışarıdan uygulanacak basıncın, seramik ön şekil verilmiş fiberler arasındaki kılcal basıncı yenebilecek derecede yüksek olarak seçilmesiyle sağlanabilmektedir [45].

Ergiyik içine takviye elemanı karıştırma

Bu metot sıvı haldeki üretim tekniklerinin en kolay ve en ucuz olanıdır. Matrisi güçlendirmek için kullanılan takviye elemanı olarak parçacıklar, whiskers veya küçük levhacıklar şeklinde güçlendiriciler ergimiş metal matris içine katılır. Ergiyik metal, eklenen bu parçaların matris içerisinde homojen olarak dağılmaları sağlanana kadar karıştırılır. Karıştırma işleminden sonra kalıp içerisine dökülerek katılaşmaya bırakılır.

Plazma püskürtme yöntemi

Plazma püskürtme, atomik yapıdaki ergimiş metal parçacıkların takviye elemanları üzerine istenilen kalınlıkta püskürtülmesi işlemidir. Püskürtülen ergiyik metal parçacıkları takviye elemanlarına yapışır ve en kısa sürede katılaşmaya başlar. Bu tip üretim yöntemi alüminyum gibi ergime sıcaklığı nispeten düşük olan metallerde uygulanır. Bu üretim metoduyla takviye elemanı üzerine istenilen kalınlığı verecek şekilde ergimiş metal püskürtülerek kompleks şekilli parçalar üretilebilir. Bunlara ilaveten, fiberler arası mesafenin kontrolü ve fiberlerin daha rahat yönlendirilebilmesi gibi avantajlara sahiptir [3].

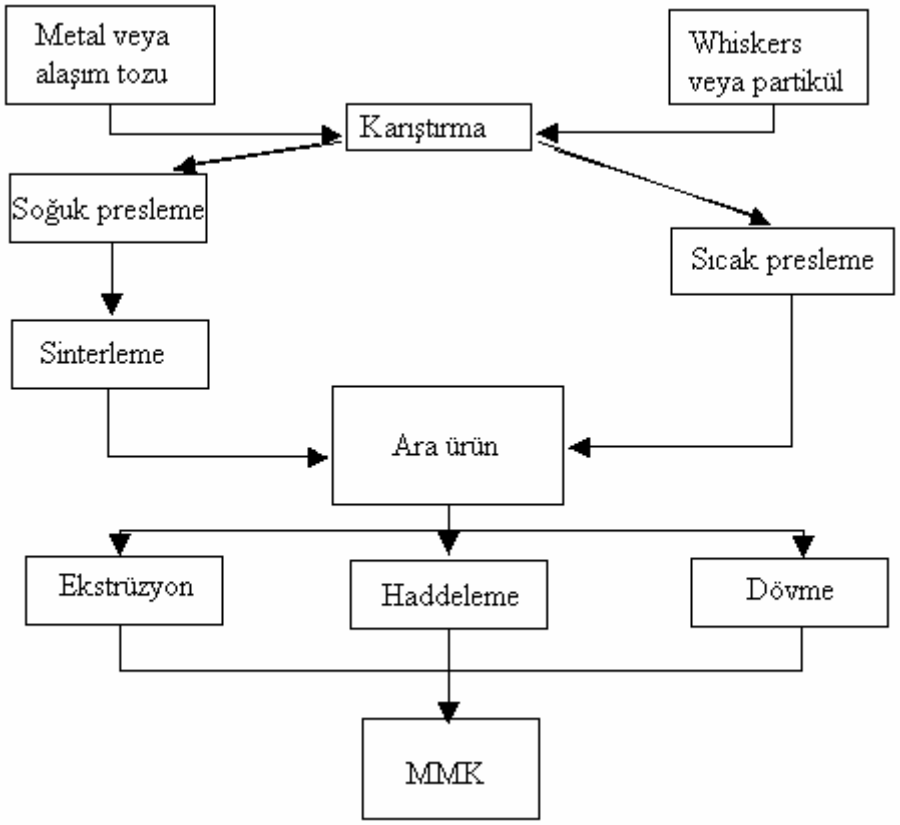
3.3.2. Katı üretim yöntemleri

Toz metalurjisi yöntemi

Takviye malzemesinin sıvı alaşım tarafından ıslatabilirliğinin düşük olması nedeniyle, ilk olarak geliştirilen üretim yöntemi, toz metalurjisidir (TM). TM yöntemi Şekil 3.7' de şematik olarak gösterilmiştir.

TM yönteminde, whiskers veya partikül şeklindeki takviye malzemesi ile metal tozlar karıştırılır. Karıştırma sonrası elde edilen karışım kalıba doldurulur. Daha sonra tozlar soğuk veya sıcak presleme ile kaplanır. Soğuk presleme sonrası kalıplanmış ürün, partikül ve matris tozu arasındaki mukavemetin arttırılması amacıyla sinterlenir. Karıştırma işleminden sonra soğuk presleme yerine sıcak preslemede kullanılabilir. Sıcak izostatik presleme (HIP) kullanımıyla soğuk preslemeye nazaran daha yüksek yoğunluğa sahip kompozit malzemeler üretilebilir. Sıcak ve soğuk presleme sonrası mukavemet kazanmış olan ara ürün, ekstrüzyon, dövme ve haddeleme gibi işlemlerle şekillendirilebilirler. Sinterleme ile % 80- 90 teorik yoğunluğa ulaşılabilir. Karıştırma sonrası elde edilen ürünün teorik yoğunluğunun elde edilmesi ve ürün mukavemetinin arttırılması amacıyla CIP/HIP yada sinterlemeyi takiben ekstrüzyon uygulanır [48].

TM yöntemiyle üretilen parçaların genelde sıvı hal üretim yöntemiyle üretilmiş parçalardan daha iyi mekanik özelliklere sahip oldukları bilinmektedir. Düşük sıcaklıklarda çalışılması, homojen katkı elemanı dağılımının sağlanabilmesi, kompozit yapının kontrolünün mümkün olması, katkı elemanlarının daha ucuz olması gibi nedenlerden dolayı özellikle parçacık takviyeli metal matrisli kompozitlerin üretiminde TM yöntemi tercih edilmektedir.



Şekil 3.7. Toz metalurjisi tekniği ile kompozit üretimi akış şeması [48].

Difüzyonlu birleştirme ve vakumda presleme

Bu metotla birleştirme, yüksek basınç ve sıcaklıkta yapılır. Bu teknikte ilk olarak, levha şeklindeki metal veya metal alaşımları ile elyaf şeklindeki takviye elemanları etkili yayılma sağlamak için kimyasal yüzey muamelesine tabi tutulmaktadır. Sonra elyaflar önceden belirlenen yönlerde, açılarda ve istenilen aralıklarda metal tabakalar üzerine yerleştirilir. Levha halinde hazırlanan bu malzemeler metal bir kaba yerleştirilerek sızdırmazlık sağlanır ve vakuma alınır. Daha sonra belirli sıcaklıkta

genelde erime sıcaklığına yakın bir sıcaklıkta ısıtılarak difüzyon ile birleşmesinin gerçekleşmesi için preslenir veya haddelenir. Ancak bu işlemde metal levhalar ile elyaf yüzeylerinin çok temiz ve oksitsiz olması gerekir. Aksi halde ara yüzeyde arzulanan bir difüzyon bağı oluşturulamaz. Çünkü kompozitin dayanımı bu oluşacak difüzyon bağına bağlıdır [28].

Yapılan bir çalışmada SiC kaplı boron elyaf takviyeli metal kompozitlerin bu metot ile başarılı şekilde üretildiği, yeterli ara yüzey bağı oluşturduğu, elyafların matris içerisindeki dağılımlarının üniform olduğu, bunun sonucu olarakta bu MMK' lerin mekanik ve aşınma özelliklerinde hayli artışlar sağladığı görülmüştür [28].

Sıcak presleme

Bu işlem, Al, Mg ve Ti gibi MMK panelleri üretmek için başarılı şekilde kullanılır. Fiberler metal matristen oluşan ince folyo tabakalar arasına yerleştirilir ve kompoziti yerinde tutmak için bir bağlayıcı ile spreylenir ve sonra bağlayıcı yakılarak ayrılır. Daha sonra ön şekil verilmiş kompozit tamburdan çıkarılır, istenilen ölçüde kesilir ve sıcak pres kalıp içine istiflenir. İstiflenmiş kütle üzerine hafif basınç uygulanır ve bağlama sıcaklığına ulaştığında gerekli zaman için tam bağ basıncı uygulanır. Daha sonra basınç kaldırılır ve termal uzamalarda uyumsuzluklardan ileri gelen kalıcı gerilmeleri en aza indirmek için komple parça yavaş şekilde soğumaya bırakılır. Sıcak presleme ile ilgili üretilen kompozitlerin [28];

1. Yüksek dayanım,
2. Dayanım/ yoğunluk oranı geleneksel malzemelerden 2- 4 kat daha yüksek olması,
3. Yüksek sıcaklıklarda dayanımı muhafaza edebilmesi,
4. Yorulma dayanımının iyi olması,
5. Karışım kuralına tam uyum göstermesi gibi avantajlara sahip olur.

4. İŞLENEBİLİRLİK VE İŞLENEBİLİRLİĞİN ÖLÇÜLMESİ

4.1. İşlenebilirlik

İşlenebilirliğin birkaç değişkene bağlı kalınarak tanımlanması olanaksızdır. İşlenebilirlik birçok değişken göz önüne alınarak ölçüldüğü gibi standarda bağlanmış bir ölçüm yöntemi de mevcut değildir. İşlenebilirlik tanımının kesin bir tanımı olmamakla birlikte aşağıdaki tanımlamalarla açıklanabilir [49].

İşlenebilirlik, bir malzemenin istenilen biçimde, boyutta veya yüzey kalitesinde işlenmesinin kolaylığını veya zorluğunu gösteren bir kavramdır [50, 51].

İşlenebilirlik, bir malzemenin talaş kaldırma işlemini etkileyen özelliklerin tamamı ve talaş kaldırma yöntemleri ile üretimin kolaylığı veya zorluğudur [51].

Aynı zamanda, işlenen yüzeyin kalitesi, standart bir talaş kaldırma miktarı için gerekli enerji, takım aşınma miktarı veya kesici takım ömrü gibi talaş kaldırma işlemlerinin bir veya daha fazla karakteristiğini bir noktada toplamak diye tanımlanabilir [50, 52].

İş parçasının kimyasal bileşimi, mikro yapısı, ısıl işlem, saflık vb. bütün değişkenler işlenebilirliği etkiler. Talaş oluşumu, takım aşınması, bitirme yüzeyi kalitesi ve kesme kuvvetleri gibi işlenebilirlik karakteristikleri ile iş parçasının işlenebilirliği belirlenebilir. Fakat bu karakteristiklerinin işleme parametrelerine de bağımlılığı önemlidir [53].

Talaşlı imalatta işlenebilirlik; tasarım, malzeme seçimi ve işlem aşamalarına ait bütün bilgileri içeren ve her ana başlık altındaki bilgilerin diğerlerine göre uygun ilişkilerde düzenlendiği bir sistematik yaklaşımı gerektirir.

Bu yaklaşım sonucunda; herhangi bir talaşlı imalat işlemine başlamada önce saptanan tezgah tipi, kesme hızı, ilerleme hızı, talaş derinliği, iş parçasının kimyasal bileşimi, mikroyapısı, ısıl işlem, saflık, kesici takım tipi ve malzemesi, kesme sıvısı gibi değişkenler, işlem sırasında ölçülen kesme kuvvetleri, talaş kaldırma sıcaklıkları, talaş özellikleri gibi değerler ve işlem sonucunda ortaya çıkan iş parçası yüzey kalitesi, toplam maliyet ve işlem süresi gibi sonuçların hepsi birden işlenebilirlik verilerini oluşturmaktadır [54].

Talaş kaldırma yönteminin teknolojik planlaması yapılırken, iş parçasının mikroyapısı, dayanımı, sünekliği, ısı iletkenliği ve sertliği göz önüne alınır. Tokluğun ve dayanımın yüksek olması daha iyi işlenebilirlik demektir. Çok sünek metallerdeki beklentiler, düşük yüzey kalitesi oluşumunda kesici kenara yığılma probleminin artması ve takım ömrünün kısalması yönündedir. Bununla birlikte, soğuk deformasyon işlemiyle sertliğin arttırılması bir çok sünek ve yumuşak metalde yüzey kalitesi bakımından işlenebilirliği arttırır [49, 55].

Düşük süneklik değerleri metallerin işlenmesinde genellikle olumlu etkiye sahiptir. Düşük süneklik kesme işlemi için gerekli gücü azaltır ve uygun talaş biçiminin oluşmasını sağlar. Bu nedenle iyi işlenebilirlik sertlik ve sünekliğin belirli değerler arasında olmasına bağlıdır [49, 55].

İşlenen malzemenin yüksek ısı iletkenliği, kesme işleminde üretilen ısının kesme bölgesinden hızla uzaklaşması işlenebilirlik açısından faydalıdır [49, 55].

Talaş kaldırma sırasında, kesme düzlemi boyunca (I. Deformasyon bölgesi) oluşan plastik deformasyon sonucu bu bölgedeki malzemenin mukavemeti artar. Artış, deformasyon hızına ve işlenen malzemenin deformasyon sertleşmesi üssüne bağlıdır. Çeliğin işlenmesinde deformasyon miktarı yüksektir ve kesme kenarına çok yakındır. Yüksek pekleşme hızı talaş oluşumunda daha çok enerjiye ihtiyaç duyulmasına sebep olmaktadır [49, 55, 56].

İşlenen malzemede bulunan inklüzyonlar, makro ve mikro inklüzyonlar olarak ikiye

ayrılmaktadır. 150 μm' den büyük olan inklüzyonlar makro kalıntılardır. Makro inklüzyonlar çok serttirler ve genellikle kalitesiz malzemelerde bulunurlar. Ani oluşan bir çok takım hatalarına sebep olurlar. Mikro inklüzyonlar işlenen malzemede daima bulunurlar, istenenler ve istenmeyenler olarak sınıflandırılırlar. İstenmeyenler (AL_2O_3 , Ca vb.) çok sert olanlardır. FeO, MnO ve MnS vb. istenenlerdir ve bunların deforme olma özellikleri yüksek olup istenilen talaşın elde edilmesine katkı sağlarlar. Ayrıca istenilen bileşiklerin fonksiyonu yüksek kesme hızlarında çok daha önemlidir [49, 55, 56].

4.1.1. İşlenebilirliğin ölçülmesi

İşlenebilirlik ölçümünün kesin kabul edilen genel bir metodu veya standardı yoktur. Ancak takım ömrü deneyleriyle ilgili standartlara göre standart işlenebilirlik deneyleri yapılabilir. İşlenebilirlik deneyleri; işlemeli deneyler veya işlemesiz deneyler olmak üzere iki temel kategoriye ayrılabilir [53].

<u>İşlemeli deneyler</u>

Bir malzemenin işlenebilirliği, aşağıda belirtilen kriterlerden birine veya daha fazlasına göre ölçülebilir

Takım ömrü: Takımdaki standart bir aşınma miktarına kadar veya takım kullanılmaz duruma gelmeden önce standart kesme şartlarında kaldırılan talaş miktarı veya talaş kaldırma süresidir.

Kesme hızı: Standart kesme şartları ve takımla, belirlenen bir zaman aralığında talaş kaldırma işlemenin başarı ile sürdürüldüğü maksimum kesme hızı veya işlenen parça sayısıdır (otomatik tezgahlarda).

Kesme kuvvetleri veya güç tüketimi: Takım üzerine etkiyen kesme kuvvetleri (belirli şartlarda dinamometre ile ölçülür) veya kesme işlemi için gerekli güçtür.

Yüzey kalitesi: Belirli işleme parametresine göre işlenen parçanın yüzeyindeki pürüzlülük derecesidir.

Talaş biçimi: Standart kesme şartları altında, takımın kesme etkisine göre oluşan talaşın biçimidir.

Takım ömrü (T) – kesme hızı (V) ilişkisi: 1907 yılında Taylor takım ömrü ile kesme hızı arasındaki bağıntıyı bulmuştur.

$$V \cdot T^{\alpha} = C$$

Burada;

V: Kesme hızı (m/dak)
T: Takım ömrü (dak)
α: Deney sabiti
C: Taylor sabiti, olarak tanımlanır.

Belirlenen bir zaman dilimi içinde (genellikle 30- 60 dak) takımın bozulmasına sebep olacak kesme hızını (V_{30} – V_{60}) ölçerek veya belirli kesme hızlarında kriter olarak alınan standart bir takım aşınması miktarına kadar geçen kesme süresi ölçülerek, işlenebilirliği değerlendirmek en çok kullanılan yöntemdir.

V- T ilişkisi içerisinde veya değişen kesme parametreleri güç tüketimi ilişkisiyle değişik malzemelerin veya farklı fiziksel özelliklerdeki aynı malzemelerin işlenebilirlik kıyaslamaları yapılabilir.

<u>İşlemesiz deneyler</u>

İşlemeli deneyden daha az zaman alır ve genellikle kısa deneylerdir. Bu sebeple birçok araştırmacı işlemsiz deneylerle çeliklerin işlenebilirliği arasında bağıntılar kurmaya çalışmışlar ve birçok ilişki ortaya artmışlardır. Bu ilişkileri esas olarak üç alt

başlık altında incelemek mümkündür. Bunlar; kimyasal bileşim deneyi, mikroyapı deneyi ve fiziksel özellik deneyi olarak sıralanabilir [53].

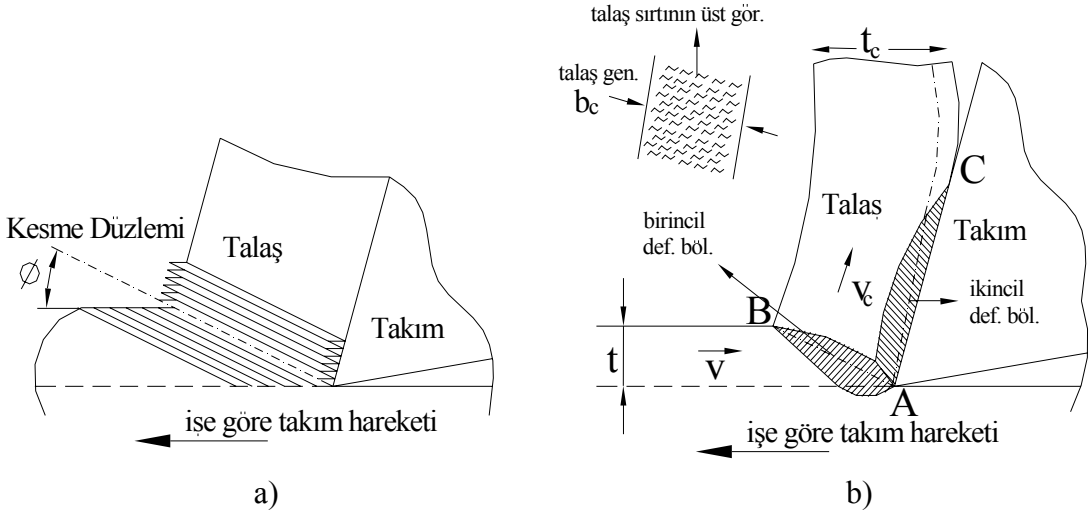
5. METAL KESME MEKANİĞİ

Metal kesme, bir talaş oluşturma işlemidir. İşlemin amacı metali belirli bir şekil ve boyuta getirmekse de bu işlemin uygun talaş oluşumunu sağlayacak şekilde yapılması zorunludur. Metal kesme talaş oluşturma ve gerekirse talaş kırma işlemidir. Talaş kırma işleminin nedeni sadece işlem sırasında oluşacak talaşın taşınma ve depolama kolaylığı değil, aynı zamanda kesme bölgesinden uzaklaşan talaşın kontrolü ve işlem sırasında oluşan ısının büyük bir bölümünün bu talaşlarda ortamdan uzaklaştırılması zorunluluğudur [57].

5.1. Talaş Oluşumu

Talaş kaldırma işlemi dik kesmede (ortogonal kesme); kayma doğrultusu boyunca yoğunlaşmayı gerektirir. Malzeme kayma düzlemine yaklaşıncaya kadar deforme olmaz. Fakat ince bir kayma bölgesi geçtiğinde oldukça fazla miktarda basit kayma meydana gelerek Şekil 5.1' de gösterildiği gibi elastik ve plastik (kalıcı) şekil değişimine uğrar ve talaş oluşur. Talaş arkası homojen olmayan uzama nedeniyle kabadır. Bu da malzeme kesilirken oluşan gerilme yığılmaları veya zayıf noktaların mevcut oluşu nedeniyle ortaya çıkmaktadır. Gerilmeli bir noktadan geçen kayma düzlemi gerilme olmayan yerdeki bir noktadan daha düşük bir gerilmeyle deforme olur. Verilen kayma düzlemi üzerinde deformasyon bir kez başladığında malzeme deformasyon sertleşmesi göstermiş olsa bile bu devam eder. İş parçası malzemesinin gerilim altında gerinme davranışı, oluşacak talaş tipini belirler [58, 59].

Talaş oluşumu, Şekil 5.1.a' da gösterilen "kart modeli" teorisine göre birincil deformasyon bölgesi içinde oluşan belirli bir kesme düzlemi boyunca meydana gelir. Kesme düzlemine kadar malzeme elastik olarak uzatılır. İlk deformasyon, oluşan bu deformasyon üzerinde başlar ve kesme yönüne yönlenmiş ardışık kesme düzlemleri boyunca devam eder. Kesme sırasında bu şekilde kaldırılan malzeme tabakasına *talaş* denir [51, 52, 60].

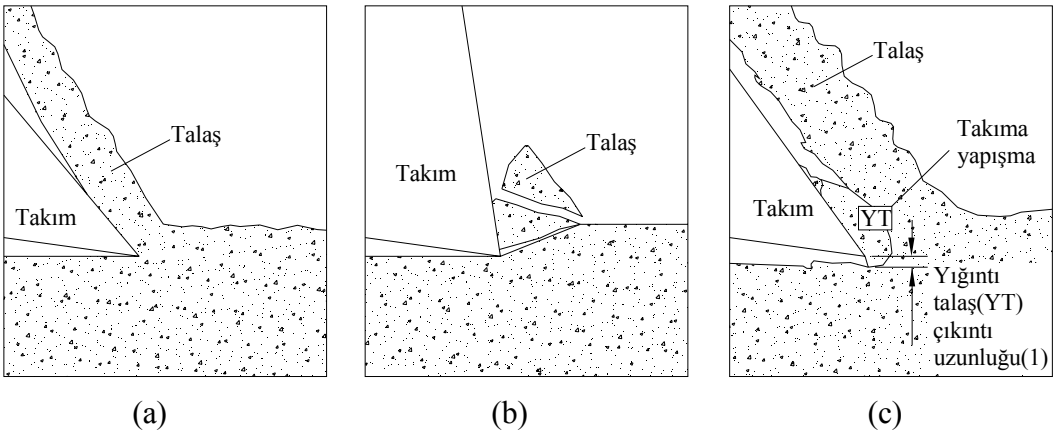


Şekil 5.1. a) Talaş oluşumunda kart modeli, b) Dik kesmenin şematik gösterim

Talaşın parça üzerinden ayrıldığı düzleme kesme düzlemi, bu düzlemin kesme yönü ile yaptığı açıya (Ø) kesme açısı denir. Kesme düzlemi boyunca parçadan ayrılacak deforme edilmemiş talaşın genişliği (b) kalınlığı (t) ile ifade edilirken, oluşan talaşın (deforme edilmiş kalınlığı t_c) t' den daha fazladır. Talaş kaldırma sırasında takım, kesme yönünde kesme hızı (V) ile ilerler ve talaş, parçadan (Vc) hızı ile uzaklaşır. Takım yüzeyi boyunca yapışma ve sürtünme etkisiyle oluşan bölge ikinci deformasyon bölgesidir (Şekil 5.1.b) [51, 52].

5.2. Talaş Tipleri

Talaş tipleri kesme hızı, ilerleme, paso derinliği, takım geometrisi, büzülme faktörü ve işlenen malzemenin mikro yapısına göre değişir. Talaşın tipi, kesme şartları derinliğine göre değişir. Talaşın tipi, kesme şartları ve yüzey kalitesi hakkında bilgi veren bir faktördür. Ayrıca talaşın tipi, talaşlı imalatın zorluğu veya kolaylılığında da etkili olmaktadır. Zira, uzun ve sürekli talaşın çıkması takıma veya tezgaha dolaşmasına, malzeme yüzey kalitesinin bozulmasına ve kesici ucun zarar görmesine neden olur. Talaş, oluşum mekanizmasına göre; sürekli, kesintili ve yığıntı talaş olmak üzere üç tip olarak meydana gelir [49, 61].



Şekil 5.2. Talaş tiplerinin şematik gösterimi. (a) Sürekli talaş, (b) Kesintili talaş, (c) Yığıntı talaş

5.2.1. Sürekli talaş (Akma talaş)

Sabit şartlarda çoğunlukla sünek malzemelerin yüksek kesme hızlarında işlenmesi sırasında makro düzeyde çatlaksız olarak meydana gelir (Şekil 5.2.a). Sürekli talaş, yüksek deformasyon nedeni ile sertleşir ve yüksek sertlik değerine ulaştığında takım aşınmasını arttırır. Sünek malzemelerde talaşın yoğun plastik deformasyonu, t' ye oranla t_c' nin artmasına sebep olur ve hacim aynı kalmasına rağmen toplam talaş boyu kısalır. Eğer büzülme faktörü (r), $r = t / t_c = 1/ 2$ civarında ise, sünek malzeme ve sürekli talaş için akma, iyi yüzeyle sonuçlanacaktır [51].

Sürekli talaşlar, bant şeklinde veya spiral ve değişik helisel şekillerde oluşmalarına rağmen, uzun talaş oluşumu kesme işlemini ve operatörü olumsuz etkilemesi bakımından istenmez [62, 63]. Bu tip talaş, sünek iş parçası, düşük talaş derinliği ve düşük ilerleme miktarı, keskin kesici uçlu takım, büyük talaş açılı kesici uç, yüksek kesme hızları, kesme sıvısı kullanılarak kesici uç ve iş parçasının soğuk tutulması, talaş akma direncinin minimum olduğu durumlarda oluşur [58].

Yukarıdaki şartlar altında kesme etkisinin sabit kaldığı söylenebilir. İşleme sırasınca harcanan güç, takım ömrü ve elde edilen yüzey kalitesi yönünden tercih edilen bir talaş biçimidir. Ancak, işçi güvenliği, otomatik çalışmada kontrol problemleri ve talaşın istenilen sınır yüzeyi açısından olumsuz tesirleri söz konusudur. Ve de bu

olumsuzlukları ortadan kaldırmak için talaş kırıcıların kullanılması gerekmektedir [63].

5.2.2. Süreksiz talaş (Kesintili talaş)

Talaş oluşumu sırasında malzeme aşırı plastik deformasyona uğrar ve eğer malzeme kırılgan ise kısmen şekillenen talaşla birlikte birinci deformasyon bölgesinde kırılma oluşur. Bu şartlar altında talaş dilimlenmiştir ve oluşan talaş kesintilidir (Şekil 5.2.b). Kesme sırasında değişen ayrılma hızı (Vc) sıkışmada en düşük, talaş kopmasında en büyük değeri alır. Takım talaş yüzeyinin yüklenmesi ise bunun tersinedir. Sürekli talaş tipine göre, periyodik değişen kesme kuvvetinin genliği büyük frekansı küçüktür [51].

Süreksiz talaş oluşumunu etkileyen faktörler şöyle sıralanabilir; gevrek iş malzemelerinde, küçük veya negatif talaş açılı kesici takım kullanımında, talaş derinliğinin fazla olması ve yüksek ilerleme miktarında, düşük kesme hızlarında, aşırı tezgah titremesi ve takım otlaması mevcut olduğunda ve otomat çeliklerinde manganez sülfür kalıntıları veya grafit lamelli dökme demirler gibi gerilim konsantrasyonu ihtiva eden malzemeler işlendiğinde ortaya çıkmaktadır [58].

Bu durumda kesme işlemi nispeten yüksek kayma açısıyla başlar ve kesme devam ettikçe azalır. Talaşta uzama belli bir değere ulaştığında işlem tekrar bunun üzerine devam eder. Sonunda ufak talaş parçacıkları oluşur [58].

Takımın talaş açısı kesintili talaş oluşumunu etkiler. Negatif talaş ile işlenen pirinç malzemede oluşan kesintili talaş, büyük pozitif talaş açılarında sürekli talaşa dönüşür [51].

Dökme demir, pirinç, çinko, porselen, sert plastik gibi farklı gerilmelere sahip ve gevrek malzemelerden talaş kaldırılması sırasında talaş sadece kısmen biçimlendirilebileceğinden ilk bozulma bölgesinde kırılma olacaktır ve bu bölgede talaş parçalara ayrılacaktır. Ayrıca, dövülebilir malzemelerin düşük kesme hızlarında

yüksek ilerlemelerle işlenmesi sırasında görülür [51, 64].

5.2.3. Yığıntı talaş (YT) (Bulit- Up Edge) (BUE)

İşlenen yüzey boyunca devamlı olarak çıkan talaşın kesici takım yüzeyine yapışmasıyla oluşan talaş tipidir. Sıcaklığın düşük olduğu kesme hızlarında, soğutma sıvısı kullanıldığı durumlarda, kesici takım önündeki metale uygulanan basma kuvveti ve aşırı sürtünmeden dolayı talaşın şekli deformasyona uğramasıyla, kesme düzlemine dik açıdaki bir düzlem boyunca talaştan kopmalar meydana gelir. Talaştan ayrılan küçük parçacıklar takıma yapışır. Kesici takıma sinterlenerek yığılan bu parçacıklar kaleme yapışan talaş veya yığıntı talaş (YT) olarak isimlendirilir (Şekil 5.2.c). Bu talaş ikinci deformasyon bölgesinde oluşmaktadır. Kritik bir boyuta ulaşıncaya kadar büyüyen bu yığıntı daha sonra talaşla birlikte ayrılır. Kesme hızındaki artışla birlikte takım- iş parçası ara yüzeyindeki sıcaklık artışı, yığıntı talaşın boyutunu küçültür. Talaş gövdesinden ara yüzeye iletilen ısının, akma gerilmesinde azalışa sebep olacak ısıl yumuşamayı sağladığı anda yapışma kaybolur [53].

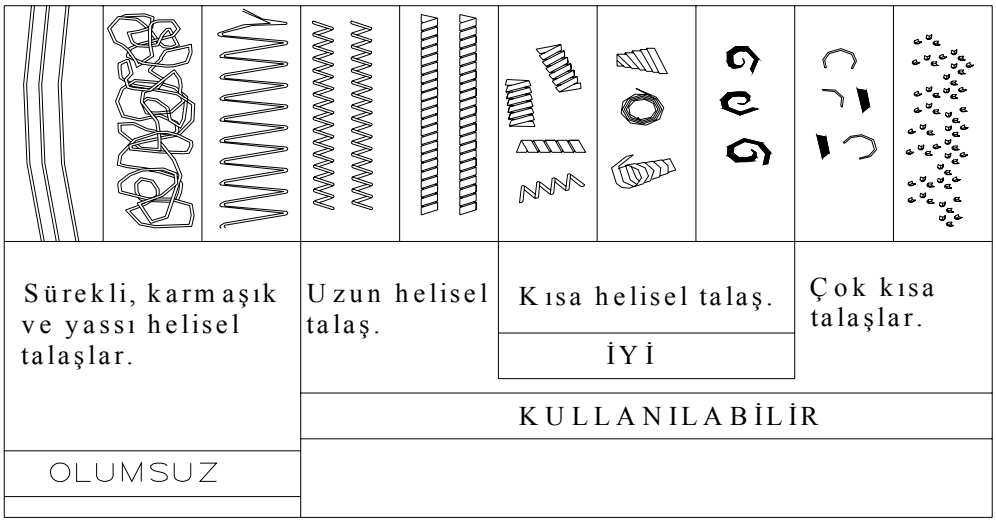
Takım/talaş yüzeyinde yapışan bu katman (YT) bazen kesici uç geometrisini korumasına rağmen takım geometrisini de değiştirebilir. Talaş yapışması kararlı değil fakat talaşa yapışarak ve takım altından geçerek veya işlenmiş yüzeye yapışarak periyodik olarak kopmaktadır. Bu yığıntı talaş (BUE) çevrimli bir değişim yükselmesi sağlayarak BUE dışarı ve içeriye doğru büyüdüğü için bu kesilen yüzeyin talaş derinliğinde bir değişme gösterir. Bu durumda kötü yüzey pürüzlülüğüne sebep olur [58].

Kararlı YT, kesici takım ucunda kayma gerilmesinin ve etkin talaş açısının artışına sebep olur. Kesici uç ile talaş arasındaki temas alanını kısıtlayarak kesme kuvvetlerini düşürebilmektedir. Bu tip talaşların elde edildiği işlemelerde malzemenin yüzey kalitesi genelde iyi değildir [54].

5.3. Talaş Şekilleri

Tezgah operatörünün çalışma şartlarında elde ettiği talaş şekilleri, işlenebilirlik açısından değerlendirilerek Şekil 5.3' te verilmiştir.

Sürekli talaşlar bant şeklinde, spiral veya değişik helisel şekillerde olmalarına rağmen talaşlı işlem açısından ideal talaşlar kısa spiral ve helisel şekilli talaşlardır. Uzun talaş oluşumu operatör için tehlikeli olmakla birlikte, talaşı kaldırması için gerekli zaman bakımından verimliliği azaltır, işlenen yüzeyi bozabilir [59].



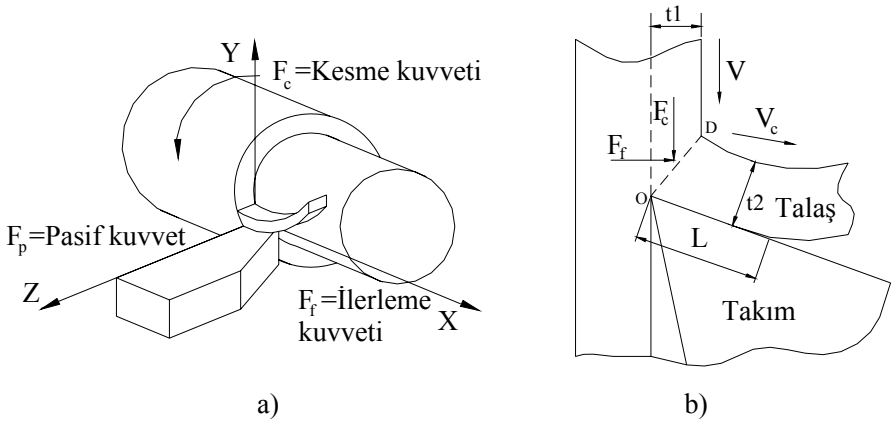
Şekil 5.3. Talaş şekilleri ve işlenebilirlik etkisi.

5.4. Kesme Kuvvetleri

Tezgah operatörü, iş parçasının işlemleriyle ilgili olarak tezgahın güç kapasitesini belirler ve böylece titreşimsiz ve rijit bir kesme operasyonu gerçekleştirmeyi arzular. Bu amaç için kesme anında etki eden kuvvetlerin bilinmesi gerekir. Şekil 5.4.a' da tornalama işleminde devreye girerek talaş alma kuvvetini (F) oluşturan kuvvet bileşenleri gösterilmiştir. Üç eksende etki yapan kuvvetlerin en önemlisi y-ekseninde takımın talaş yüzeyine etki eden kesme kuvveti (F_c)' dir. İş parçasının dönme hareketiyle oluşturduğu bu kuvvet kesme köşesine dik etki eder. Takımın x-ekseninde etki eden kuvvete ilerleme (Paso) kuvveti (F_f) denir. Bu iki kuvvet temelde

kesme esnasında oluşan gerilmeleri belirler. z-ekseninde etki eden ve takım iş parçası üzerinden geri itilen üçüncü kuvvet bileşeni (pasif kuvvet, F_p) ise çok küçük olmasından ötürü önemsizdir. Genelde takım aşınmasının kuvvetler üzerine oldukça olumsuz etkisi vardır. Serbest yüzeyin 100 μm' lik aşınması Fc' yi % 10, Ff' yi % 25 artırır [59].

İlgili kuvvetler temelde iş parçası malzemesi içinde akmaya neden olarak talaş oluşumuna yol açar. Malzemenin akması şekil 5.4.b' de OD-ekseniyle gösterilen akma bölgesinde olur ve malzemenin akma dayanımına eşittir [59]. Akma alanının boyutunun eşit kalması kabullenildiğinde, her çeşit malzeme akma sınırını yükselten alaşımlama ve ısıl işlem, talaş oluşumu için gerekli kuvveti (F) artırır. Keza tezgah operatörünün kontrolünde olan ve talaş kesitini belirleyen paso ve kesme derinliğine paralel olarak kuvvetler artar [59].

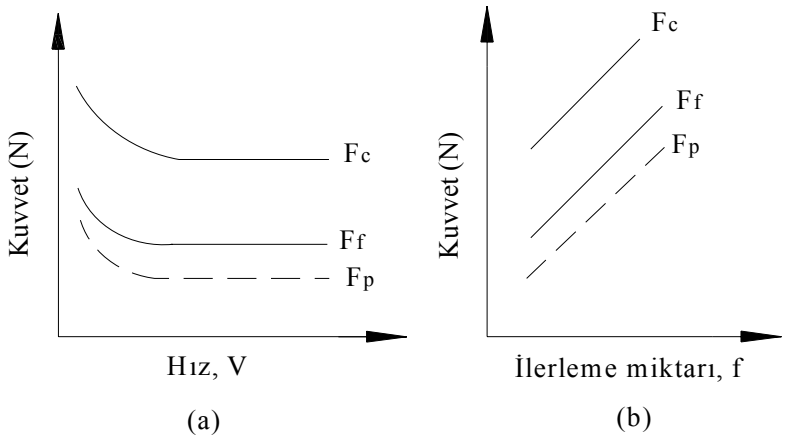


Şekil 5.4. (a) Talaşlı işlemde etki eden talaş alma kuvveti ve kuvvet bileşenleri. (b) Tornalamada iş parçası malzemesi içinde oluşan akma alanı ve iş parçası ile takım temas yüzeyinde oluşan kayma alanı [59].

5.4.1. Kesme kuvvetlerini etkileyen faktörler

Tornalama işleminde hemen hemen bütün kesme şartları, kesme kuvvetlerini etkilemektedir. Bunlardan en önemlileri ise; kaldırılan talaş miktarı(talaş derinliği ve ilerleme miktarı), kesme hızı, kesme sıvısı, kalem geometrisi ve kalem aşınmasının etkisi olarak sıralanabilir [49].

Takım üzerine etkiyen kuvvetler kesici takımların tasarımında düşünülmesi gereken faktörlerden biri olup çok karmaşık ve talaşlı üretim teknolojisinin önemli bir yanını oluşturmaktadır. Takım malzemeleri de takım kuvvetlerine etki eder. Belirli bir takım malzemesi diğeri yerine kullanıldığı zaman kesme şartları ve takım geometrisi sabit tutulsa bile keza oluşan kuvvetler hayli değişmektedir. Bu muhtemel sınırlandırılmış takım temas alanındaki değişikliklerden kaynaklanır. Kesme hızı ve ilerleme miktarının kesme kuvvetine üzerine etkisi Şekil 5.5' de gösterilmiştir [58].



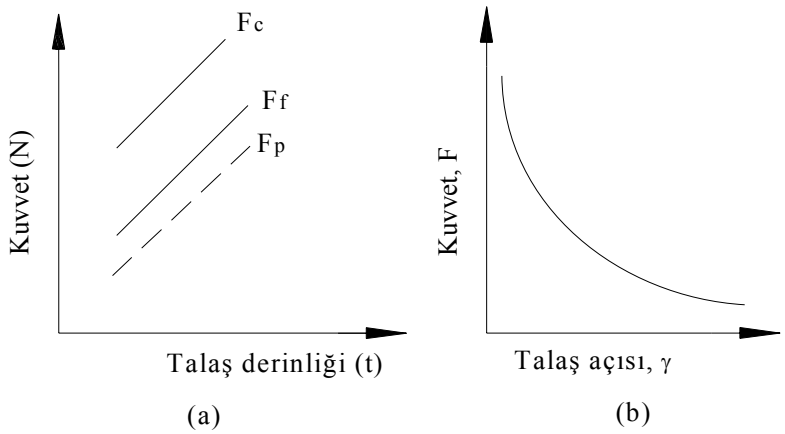
Şekil 5.5. Kesme kuvvetleri ve kesme parametreleri arasında ilişkiler. (a) Kesme-kuvvet ilişkisi, (b) İlerleme miktarı-kuvvet ilişkisi.

Şekilden de anlaşılacağı gibi ilerleme miktarı artığında hem kesme hemde ilerleme kuvveti artmaktadır. Ancak yaklaşık 100 m/dak' ya kadar hızlarda kesme kuvveti yaklaşık 250 N ulaşırken, 60 m/dak' da bu değer yaklaşık 400 N' a kadar artmaktadır. Dolayısıyla düşük hızlarda kesme kuvvetinin etkisi, büyükken yüksek hızlarda etkinin kaybolduğu görülmektedir. Fakat bu şekilden de görüldüğü gibi ilerleme miktarı ile kesme kuvveti arasında doğrusal bir ilişki mevcuttur. Bunun anlamı ilerleme miktarı arttıkça kesme kuvvetleri de artış göstermektedirler. Her hangi bir sistemde en önemli etki esas kesme kuvveti olan F_c kuvvetidir. Çizelge 5.1 ve Şekil 5.5.b' de gösterildiği gibi, ilerleme miktarı 2 kat arttığında kesme kuvvetleri de yaklaşık 2 kat artmaktadır. Bunlara ilaveten talaş açısı azaldığında kesme kuvvetleri artmaktadır [58].

Çizelge 5.1. Kesme kuvvetinin, talaş açısı ve ilerleme miktarıyla değişimi.

Talaş açısı (γ)	Kesme kuvveti (N) İlerleme miktarı 0,1 mm/dev	0,2 mm/dev	İlerleme kuvveti (N) İlerleme miktarı 0,1 mm/dev	0,2 mm/dev
5°	1013	--	3102	--
10°	840	11020	2810	1020
15°	143	1328	200	320
20°	716	1210	1101	220
25°	627	11108	80	116
30°	600	10100	410	410

Kesme derinliği ve ilerleme miktarı arttıkça kesme kuvvetleri de artmaktadır (Şekil 5.6.a). Kesme kuvvetleri kesici takım geometrisinden de etkilenir. Bu konuda talaş açısı önemli bir parametredir. Kesici takım üzerine etki eden kesme kuvveti Şekil 5.6.b de gösterildiği gibi, talaş açısının artması ile azalır. Ancak talaş açısının artmasıyla takım zayıflar ve talaş açısındaki artış takım üzerine etki eden kuvvetin azalmasıyla elde edilen kazancı aştığında talaş açısındaki artışın etkili olması sona erer.



Şekil 5.6. (a) Talaş derinliğinin kesme kuvveti üzerine etkisi, (b) Talaş açısının kesme kuvveti üzerine etkisi.

Genellikle, gevrek malzemeleri işlemek için küçük talaş açılı takım ve sünek malzemeler için de Çizelge 5.2' de gösterildiği gibi daha büyük talaş açılı takım kullanılır [58].

Çizelge 5.2. Talaş açısının çeşitli malzemelere göre değişimi (yaklaşık olarak).

Kesilen malzeme	Sert prinç, bronz, dökme demir (^{o})	Yumuşak karbonlu çelik, orta dökme demir, bronz, pirinç (^{o})	Orta karbonlu çelik, yumuşak dökme demir, prinç, bronz (^{o})	Düşük karbon çeliği (^{o})	Alüminyum ve hafif alaşımlar (^{o})
Talaş açısı	0	8	10	20	40

Yukarıdaki gösterildiği gibi malzeme cinsine göre talaş açısı değişmekte olup yumuşak malzemelerde artarken sert malzemelerde azalmaktadır. Talaş açısı azaldığında Şekil 5.6.b' da görüldüğü gibi kesme kuvvetlerinin artığı görülmektedir [58].

Çoğu metal ve alaşımlarında talaş kaldırırken, kesme hızındaki artışla birlikte kuvvetlerinde azalma meydana gelir.

Kesme hızıyla birlikte F_c ve F_f' deki azalma düşük kesme hızlarında daha belirgindir. Kuvvetlerdeki bu düşüşe, kısmen temas alanındaki azalma, kısmen de kesme hızındaki artışla birlikte sıcaklıktaki artışın akma mukavemeti sebep olur [49, 51].

5.5. Yüzey Pürüzlüğü

Yüzey pürüzlüğü ince talaş kaldırma işlemlerinde çok önemli bir kriterdir. Pratikte yüzey pürüzlüğü, malzeme yüzeyinin düzgün ve parlak oluşuna bağlı değildir. Bu nedenle metallerin işlenmesine bakacak olursak, işlenecek yüzeyin arzu edilen özelliklerini uygun olarak belirlememiz gerekmektedir. Yüzey durumu pürüzlük, dalgalanma ve eğrilik olarak ayırabiliriz. Pürüzlük üretim metodundan kaynaklanır. Yüzey pürüzlüğüne sebep olan kesme işlemleri şöyle sıralanabilir [49];

- Takım kesici kenarının keskinliği
- Takım işleme esnasında malzemenin yırtılması
- İşlenen yüzeyde yığıntı talaşın kalması
- Takım ucundaki talaş kırıcının yapısı

- Kararlı yığıntı talaşın varlığı.

Ortalama pürüzlülüğün (Ra) karakteristikleri şöyledir;

1. Örnek bir uzunluktaki Ra değeri ortalama pürüzlülüğü temsil eder. Bu nedenle tek bir çukurun veya yükseltinin ortalama pürüzlülük üzerindeki etkisi çok küçüktür.
2. Pratikte, değişik örnek uzunluklarında ölçüm yaparak Ra değeri elde edilir. Böylece incelenen yüzeyin Ra değerini belirleyen bir değer elde edilmiş olur.
3. Yüzey pürüzlülüğü için ölçüm yönü çok önemlidir. İşlenecek parçanın yapısına ve uygulanan işleme bağlıdır.
4. Düzensizlik yapısı veya profil hakkında Ra bir bilgi vermez.
5. Ra değeri mikrometre (μm) veya mikro inç (μin) birimi ile belirlenir.
6. Ra yüzey pürüzlülüğü hakkında tam bir bilgi vermez. Çünkü aynı Ra değeri farklı yüzey tiplerinde elde edilebilir. Bu nedenle, Ra değerine ilaveten Rmax değeri de verilir [56].

Talaş kaldırma işlemlerinin yüzey pürüzlüğüne etkisi aşağıdaki iki bağımsız değişkenle özetlenir [61]:

1. İdeal yüzey pürüzlüğü; kesici takımın geometrisi, ilerleme veya ilerleme hızının sonucudur.
2. Doğal yüzey pürüzlüğü; talaş kaldırma işlemindeki düzensizliklerin sonucudur.

5.5.1. İdeal yüzey pürüzlüğü

İdeal kesici takım seçilerek (hatalar, vuruntular, yığıntı talaş, titreşim ve takımın hatalı bağlanması v.b.) kesici uç biçimine ve ilerlemeye bağlı olarak elde edilen en iyi yüzey pürüzlüğü “ideal” yüzey pürüzlüğü olarak adlandırılabilir [49, 61].

Yüzey pürüzlülüğü ölçümlerinde en çok kullanılan yöntem Ra aritmetik ortalama değeri olarak bilinir.

Pürüzlülük ölçümlerinde kriter olarak alınan aritmetik ortalama (Ra), enine kesit pürüzlülük alanlarının aritmetik ortalaması; ortalama pürüzlülük derinliği (Rz), arka arkaya gelen ölçüm uzunluklarında bulunan her bir pürüzlülük derinliklerinin (Zi) ortalamasıdır [49].

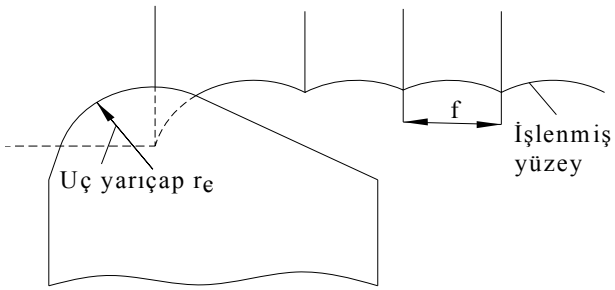
Genellikle, pratik kesme işlemlerinde kullanılan takımların ucu yuvarlatılmıştır. İdeal şartlarda bu tür takımla işlenen yüzey Şekil 5.7‘ de gösterilmiştir. Böyle bir yüzey için matematiksel ortalama pürüzlük değerini veren teorik eşitliğin esası, uç kavis yarıçapı ve ilerleme ile yakından bağlantılıdır.

Uç kavis yarı çapı r_ϵ olduğunda;

$R_A = 0{,}00321 \cdot f^2 / r_\epsilon$ yazılabilir.

Burada;

R_A= Profil çaplarının aritmetik ortalamasıdır.



Şekil 5.7. Yuvarlak uçlu bir takım için yüzey pürüzlüğünün ideal modeli [52, 61].

5.5.2. Doğal yüzey pürüzlüğü

Doğal yüzey pürüzlüğü, gerçek yüzey pürüzlüğünün büyük bir kısmını içerir. Doğal yüzey pürüzlüğünü, takım tezgahı, iş bağlama sistemi ve çalışma ortamı gibi faktörler etkiler. Bununla birlikte kesici kenarındaki yığıntı talaşlarda doğal yüzey pürüzlüğünü arttıran faktörlerdendir. Kararsız YT devamlı olarak oluşur ve kopar. Bu durum, daha pürüzlü bir yüzeyin oluşmasına neden olur. Kesme hızındaki artışla

ideal yüzey pürüzlüğüne yaklaşır. Uç yarıçapı sabit kalmak şartıyla, ilerleme hızındaki artış ise yüzey pürüzlüğünü arttırır [61, 65].

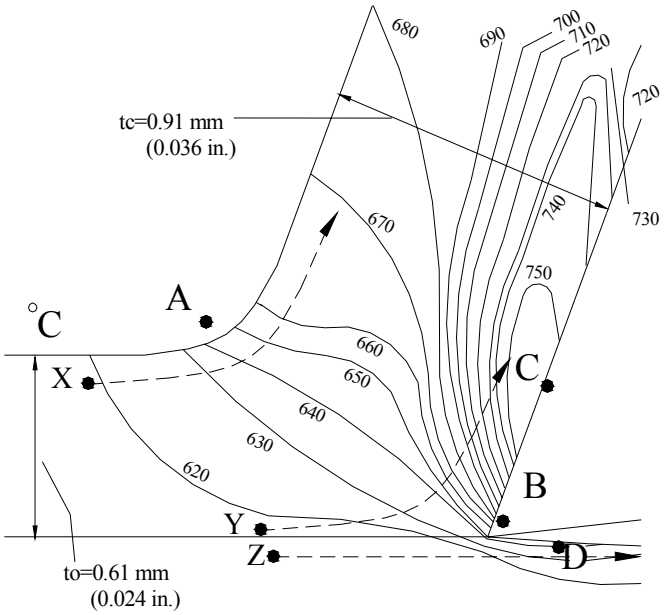
5.6. Talaş Kaldırmada Isı Oluşumu ve Sıcaklık Dağılımı

Bir malzeme plastik olarak deforme edildiği zaman kullanılan enerjinin çoğu ısıya dönüştürülür. Talaş kaldırma anında malzeme aşırı derecede gerilmeye maruz kalır ve elastik şekil değişimi toplam deformasyonun çok küçük bir kısmını oluşturur. Buda göstermektedir ki bütün enerji ısıya dönüşmektedir [53].

Bu sebeple kesme bölgesinde ısı oluşumu ve sıcaklık talaş, kaldırma işlemindeki diğer bir önemli faktördür. Bu faktör takım performansı ve iş parçası kalitesi açısından da büyük bir öneme sahiptir. Aşırı sıcaklıklar; öncelikle yetersiz "takım ömrü" ne ve yüksek kesme hızlarında sınırlamalara sebep olur [63].

Şekil 5.8' de gösterildiği gibi enerjinin ısıya dönüşümü, birincil (AB) ve ikincil (BC) plastik deformasyon bölgesinde oluşur. Eğer, kesici takım yeterince keskin değilse, iş parçası yeni yüzeyi ve takım arsındaki sürtünme sebebi ile üçüncü bir ısı kaynağı (BD) oluşacaktır [51].

Şekil 5.8' de dik kesme sırasında talaş ve iş parçasında oluşan deneysel sıcaklık dağılımı gösterilmektedir. Kesici takıma doğru hareket eden malzemedeki X noktası birinci deformasyon bölgesine doğru yaklaşır ve geçer. X noktası bu bölgeden ayrılana kadar ısıtılır ve talaş içine doğru taşınır. Y noktası her iki deformasyon bölgesinden geçer ve ikincil deformasyon bölgesinden ayrılana kadar ısıtılır. Bu nokta talaş gövdesine ısı iletimi yoluyla soğutulur ve talaşta üniform bir sıcaklık dağılımı oluşturur. Böylece kesici kenardan belirli bir mesafede takım yüzeyi boyunca maksimum sıcaklık oluşur. İş parçası içinde kalan Z noktası birincil deformasyon bölgesinde ısı iletimi yoluyla ısıtılır [51].



Şekil 5.8. Dik kesme sırasında talaş ve iş parçası arasındaki sıcaklık dağılımı.

Talaş içindeki maksimum sıcaklık ikincil deformasyon bölgesinde oluşur ve aşağıdaki eşitlikle verilir.

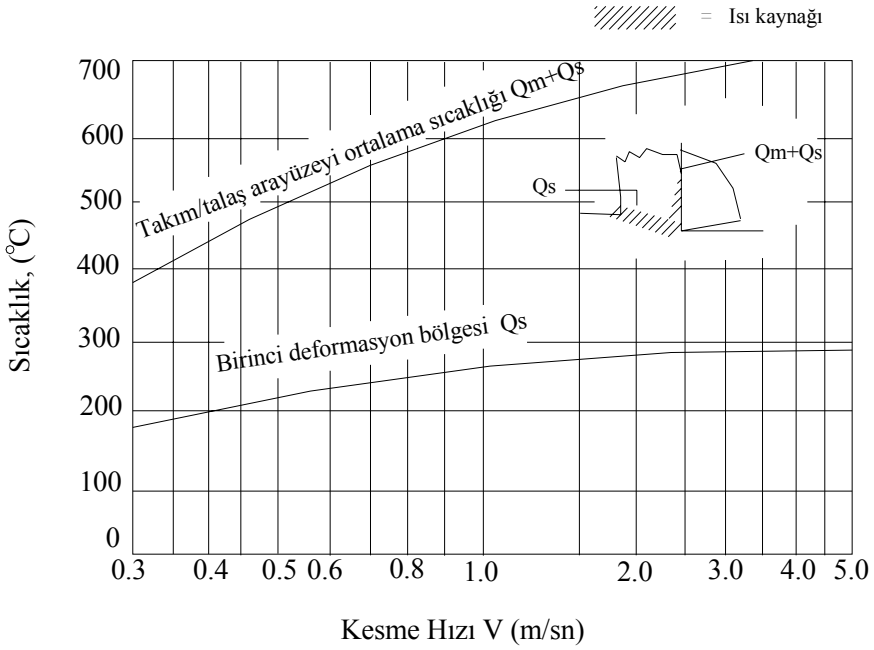
$Q_{max} = Q_m + Q_s + Q_o$ [61].

Q_s: Birinci deformasyon bölgesinde oluşan sıcaklık

Q_o: İş parçası başlangıç sıcaklığı

Q_m: İkinci deformasyon bölgesi boyunca sürtünmeli ısı oluşumunun malzemedeki sıcaklık artışı.

Kesme hızının artışı ile birincil kesme bölgesinde hafif bir sıcaklık artması olmakta ve sonra sabit kalmaktadır. Bununla birlikte, kesme hızındaki artışla takım talaş ara yüzey sıcaklığı ($Q_m + Q_s$) hızlıca artmaktadır (Şekil 5.9) [61]. İkincil deformasyon bölgesinde oluşan bu ani sıcaklık artışı takımla temas uzunluğu boyunca kesici takım performansını etkiler [53].



Şekil 5.9. Kesme hızının talaş kaldırmada oluşan ısı üzerine etkisi (teorik).

Takımdaki krater aşınmasının artması doğrudan doğruya takım talaş ara yüzeyi boyunca oluşan sıcaklık dağılımı ile ilgilidir. Takım talaş ve yan yüzeyindeki aşınma miktarının artması ile birlikte Q_{max} değeri de artar. Ancak kritik bir sıcaklık artışı yavaşlar [51].

Isının büyük bir kısmı kayma bölgesinde ortaya çıkmaktadır. Bu sebeple, takım ve talaş arasındaki temas miktarı ve kalitesi performansı etkiler. Daha küçük talaş açısı neticesinde oluşabilen daha küçük kayma düzlemi açıları iş parçasına doğru olan ısı akışının artmasına sebep olabilir [63].

Enerjinin daha küçük bir kısmı akma bölgesi boyunca ısıya dönüşür. Talaş ve takım arasındaki bu ince erimiş bölge durumu, yeni talaş malzemesinin sürekli akışı ve talaş yüzeyine yapışan malzemeye karşı oluşan kopma tesirinden etkilenir. Modern kesici uçlarda bu kesme etkisi, kesici kenardaki ısı oluşumunu minimize etmek için optimize edilmektedir [63]. Kesici uç sıcaklığı, kesme hızıyla yakından ilgili olduğundan takım/talaş ara yüzey sıcaklığı üzerine kesme hızının önemli etkisi vardır ve ara yüzeyde takımın aşınma miktarını arttırır [58].

Üçüncü ısı kaynağı (takım ve iş parçasının işlenmiş kısmı arasındaki serbest kenarda) mümkün olduğunca küçük tutulmalıdır. Yeterli kesici kenar boşluk açısı ve bu boşluk açısını azaltan aşırı yan yüzey aşınmasını engellemek, önemli faktörlerdir. Bu boşluğun azalmasına izin verilirse, yüksek sıcaklıklar daha hızlı takım kırılmasına sebep olabilir [63].

5.7. Takım Ömrü ve Aşınması

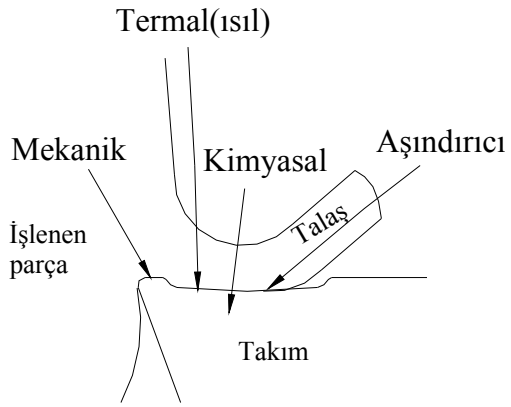
5.7.1. Aşınma mekanizmaları

Aşınma, kesici takımın malzeme kaybından ileri gelen ve ilk şekline göre oluşan farklılıktır. Bütün kesici takımlar talaş kaldırma işlemi sırasında aşınır ve bu aşınma, kesici takım, takım ömrünü tamamlayıncaya kadar devam eder [52]. Kesici kenar ömrü dakika olarak ifade edilir ve günümüzde takım ömrü, eskiden olduğundan daha azdır ve çoğunlukla 15 dakikalık bir süre üzerine oturtulmakla beraber genellikle bir miktar daha fazla olur. Kesici ucun, iş parçalarını, kabul edilebilir parametrelerin sınırları dahilinde işlemesi sırasında gerçekleşecek üretim zamanıdır. İlk zamanlarda, takım ömrü parametresi sadece takımın artık daha fazla kesme yapmaması gibi basitçe ifade edilirdi. Günümüzde; yüzey dokusu (yüzeyin yapısı-görünümü), hassasiyet, takım aşınma biçimi, talaş oluşumu ve önceden kestirilebilir takım ömrü gibi yaygın parametreler söz konusudur [63].

Kaba talaş alma işlemlerinde aşınma kesici kenarı daha uzun bir parçası boyunca gelişir. Yüzey dokusunda bir sınırlama ve hassasiyetin çok küçük olmamasından dolayı nispeten daha fazla aşınmaya göz yumulabilir. Takım ömrü belki, kesici kenar talaş kontrol yeteneğini kaybettiğinde veya aşınma şekli, muhtemel hızlı bir takım kırılma riskinin olabileceği bir seviyeye geldiğinde sınırlandırılabilir (sona ermiş kabul edilebilir) [63].

Takım aşınması, kesici kenar üzerindeki yük faktörlerinin bir kombinasyonunun ürünüdür. Kesici kenar ömrü, takım geometrisini değiştirmeye çalışan çeşitli yüklerle

belirlenmektedir. Aşınma, takım – iş parçası – işleme şartları arasındaki karşılıklı etkileşimin sonucu olmaktadır. Temel yük faktörleri ve aşınma bölgeleri şematik olarak Şekil 5.10' de gösterilmektedir [63].



Şekil 5.10. Tipik aşınma bölgeleri ve temel yük faktörleri.

Mekanik yüklerin statik bileşenlerinden başka, talaş biçimlenme sürecinin kendisinden oluşan çeşitli dinamik yüklerde söz konusudur. Bunların en önemlileri değişen talaş derinliğinden, kesintili (vuruntulu) işlemeden kaynaklananlar ve frezelemede görülenlerdir [63].

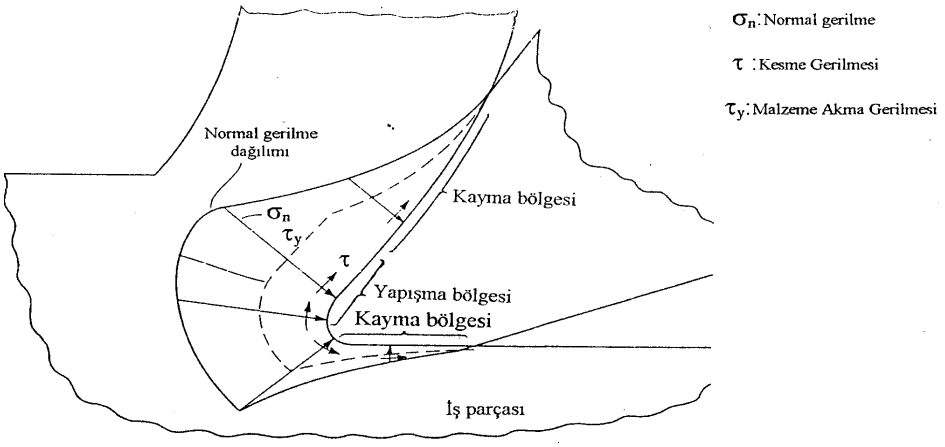
Talaş kaldırma (metalin işlenmesi) talaş yüzeyinde ve kesici ucun yan yüzeyinde (yanaklarında) çok miktarda ısı oluşmasına neden olur. Termal (ısıl) yük önemli ölçüde takım malzemesi üzerindedir ve frezelemede olduğu gibi bazı işlemlerde, kesici kenarlar iş parçasından ayrılırken ve tekrar girerken ortaya çıkan dinamik bir faktördür [63].

Talaş oluşumu-biçimlenmesi süreci, devamlı olarak yeni bir metal ara yüzeyi oluşturulması anlamı taşır ve talaş biçimlenmesi sırasında takım malzemesi boyunca hayli yüksek sıcaklık ve basınçta zorlama vardır. Oluşan bölgeler metallerin kimyasal reaksiyonları ve difüzyon için oldukça uygun bir ortam hazırlar [63].

Pek çok iş parçası malzemesinin işlenmesi sırasında, sertlikleri takım malzemesi ile karşılaştırılabilecek kadar yüksek çeşitli tipte oldukça sert partiküller (parçacıklar)

görülür. Daha sonra bunlar takım üzerinde taşlamadan daha çok aşındırma etkisi oluşturan bir sınır halini alırlar [63].

Takım aşınması, kesici kenar üzerine uygulanan yük faktörleri kombinasyonunun bir etkisidir. Şekil 5.11' de takım aşınma yüzeylerindeki gerilmelerin dağılımını göstermiştir [51].

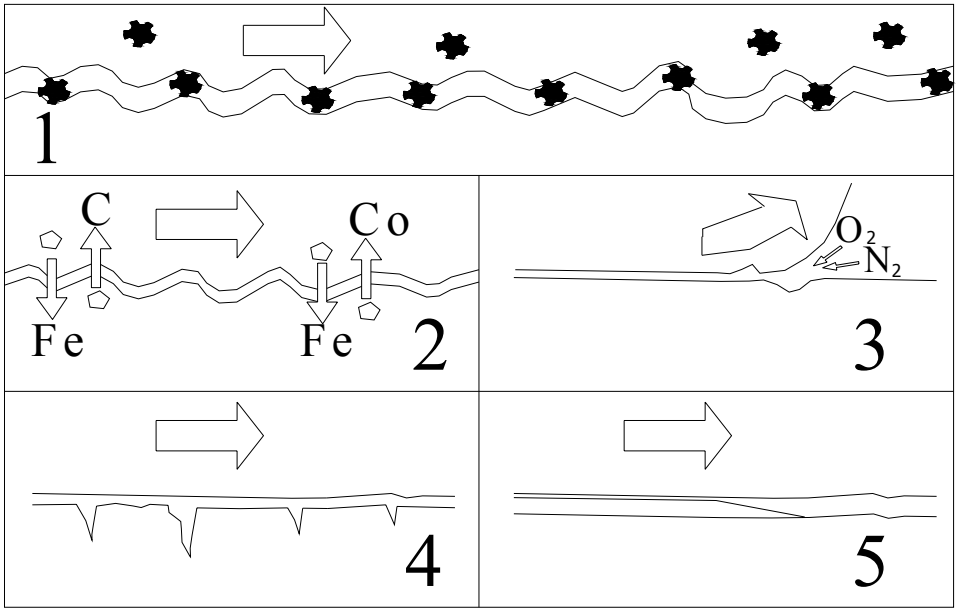


Şekil 5.11. Takım aşınma yüzeyindeki gerilmelerin şematik gösterimi.

Esas yük faktörleri sebebi ile talaş kaldırma sırasında meydana gelen birkaç temel aşınma mekanizması aşağıda sıralanmıştır.

1. Abrasiv (sürtünme) ile aşınma
2. Difüzyon aşınması
3. Oksidasyon aşınması
4. Yorulma aşınması
5. Adheziv (yapışma) ile aşınma

Şekil 5.12' de metallerin işlenmesinde karşılaşılan temel aşınma mekanizmaları görülmektedir.



Şekil 5.12. Metallerin işlenmesinde karşılaşılan temel aşınma mekanizmaları;1. Abrasiv aşınma, 2. Difüzyon aşınması, 3. Oksidasyon aşınması, 4. Yorulma aşınması, 5. Adheziv aşınma.

Abrasiv (sürtünme) ile aşınma

Triboloji bir sürtünme sistemi içerisinde sert malzemenin yumuşak karşıtını çizerek aşındırmasıdır. Sürtünme aşınmasında yumuşak malzeme mikro sabanlama, mikro talaş kaldırma, mikro kırılma ve mikro yorulma yoluyla aşınır.

Takım malzemeleri genellikle mikro yapısal sert fazlarda oluşturulur. Ancak iş parçası malzemesinde, örneğin çelik içerisinde benzer veya daha yüksek sertlikte oksit, nitrür ve karbür fazları bulunabilir. Özellikle keskin uçlu bu sert fazlar mikro kesmeler ve daha yüksek aşınmaya sebep olurlar. Yumuşak küresel kalıntılar, tanecik sürtünmesi aşınması oluşturmaktan ziyade plastik deformasyon yoluyla yüzeyde yivler meydana getirirler [51, 59, 66].

Difüzyon ile aşınma

Talaş takım malzemesi arasındaki temas yüzeyinde artan sıcaklık difüzyona sebep olur. Böylece talaş- takım ara yüzeyinde her iki yöne gerçekleşen atomsal düzeydeki

yayınım nedeni ile takım malzemesi mikro yapısal değişime uğrar. Malzemeler arasındaki metalurjik ilişki aşınma mekanizmasının miktarını belirler [51, 59].

Malzemeler arasındaki metalurjik ilişki aşınma işleminin miktarını belirler. Örneğin, çelik tungsten karbür birbirine karşı difüzyon aşınmasını geliştirme eğilimindedir. Bu durum, takımın talaş yüzeyinde bir krater oluşmasıyla sonuçlanır. Difüzyon ile aşınma mekanizması çoğunlukla sıcaklığa bağlıdır. Bu nedenle yüksek kesme hızında daha fazla oluşur. İki şekilde atomik yayınım meydana gelir; birincisi takım içine çelikten demir transferi, ikincisi ise karbonun talaşa difüzyonu [51].

Oksidasyon aşınması

Pek çok malzeme için oksitlenme oldukça farklı olmakla birlikte, metal malzemelerin çoğu için yüksek sıcaklık ve havanın varlığı oksidasyon oluşumunu sağlayan nedenlerdir. Oksidasyon aşınması mekanizmasında, oluşan oksidasyon kesici kenarda tipik çentiklerin oluşmasına sebep olur. Kesme işlemi esnasında boşluk yüzeyi üzerinde bir oksit tabakası oluşturur ki bu kademeli olarak kratere doğru yayılır. Kesme devam ederken krater derinleşir ve oksit tabakası oluşur, bunun sonunda kopar bu kopma takımın kesme yapmayan kısmı üzerinde gerçekleşmekte ve bu nedenle takım performansını etkilememektedir. Ancak bu, kazımadan sonra takımın burun kırılmasına, dolayısıyla takım bozulmasına yol açabilir [3].

Yorulma ile aşınma

Termo-mekanik bir kombinasyondur. Sıcaklıktaki düzensiz değişimler ve kesme kuvvetlerindeki dinamik değişimler kesici kenarlardan çatlamaya ve kırılmaya sebep olur. Titreşimli ve seri darbeli talaş kaldırmada, sıcaklık etkisi altında, kritik bir periyodik yüklemenin oluşması ile takım malzemesi termal yorulur. Yorulma sonucu çatlaklar ilerleyerek takım malzemesinden mikroskobik boyutta küçük parçacıklar kopar [59, 63]. Düşük ve orta hızlarda, titreşim etkili kesmelerde oluşan bu aşınma mekanizması, kesici kenarın, üzerinde oluşan yığıntı talaş altında kalması sebebi ile zor belirlenir [51].

Adheziv (yapışma) ile aşınma

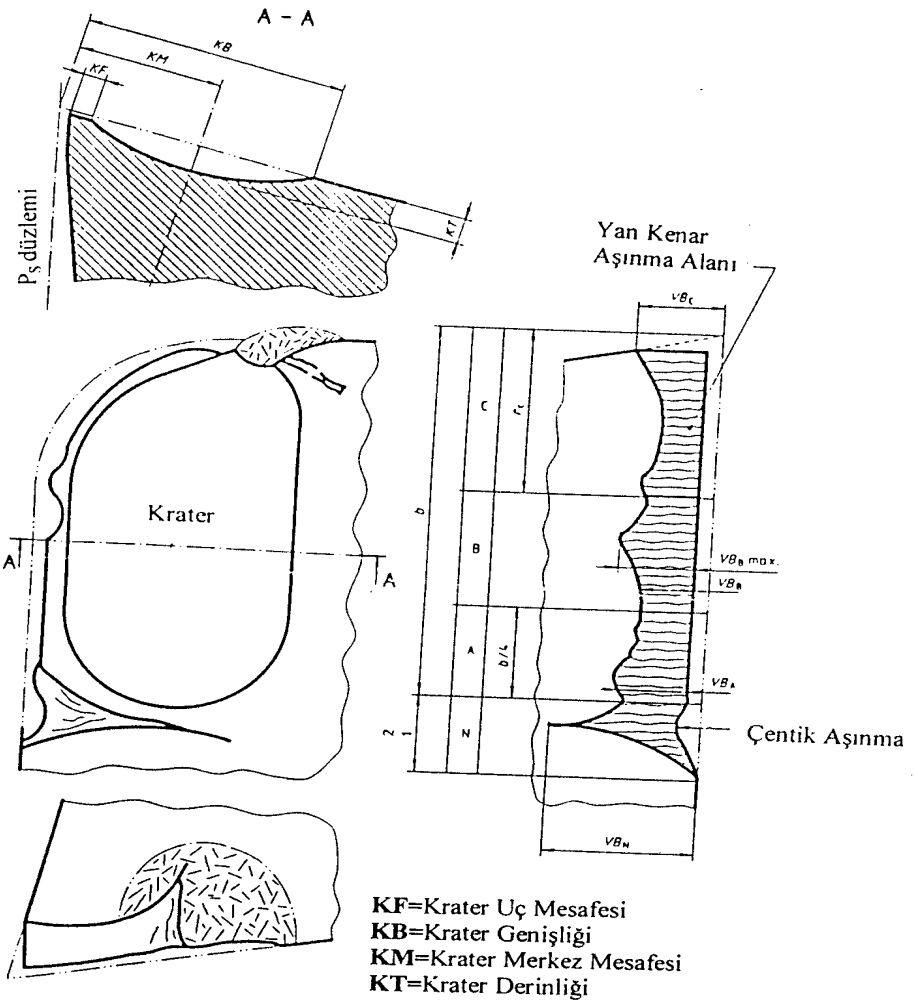
Bu aşınma aynı zamanda *yıpranma aşınması* diye de bilinir. Takım talaş ara yüzeyinde daha çok düşük işleme sıcaklıklarında oluşur. Uzun talaş (akma talaş) ve kısa (kopuk) talaş veren iş parçası malzemelerinin hepsinde (çelik- alüminyum ve dökme demir gibi) söz konusu olabilir. Bu mekanizma genellikle kesici kenar ile talaş arasında kenarda yığılmış talaş (BUE) oluşmasına sebep olur. Dinamik bir yapısı vardır. Talaştan birbirini takip eden katmanlar talaş yüzeyine kaynaklanarak sertleşir ve kesici kenarın bir parçası halini alır. BUE tabakası yırtılıp (kopup) uzaklaşır ve tekrar birikmeye başlayabilir veya kesici kenardan küçük parçaların kırılıp uzaklaşmasına, kırılmaya sebep olabilir. Bazı kesici malzemeleri ve bazı iş parçası malzemeleri örneğin sünek (özlü-çekilebilir) çelikler gibi, bu basınçla kaynamaya diğerlerinden daha fazla eğilim gösterirler. Daha yüksek işleme sıcaklıklarına ulaşıldığında bu durum için şartlar önemli ölçüde ortadan kalkar.

Belirli bir sıcaklık aralığı, takım ve iş parçası malzemesi arasındaki yakınlık ve kesme kuvvetleri ile oluşan yüklerin kombinasyonu yapışma ile aşınma (adhezyon) mekanizmasını oluşturur [63].

5.7.2. Aşınma şekilleri

Takım aşınması malzemelerin işlenebilirliğinde önemli bir yer tutmaktadır. Diğer işlenebilirlik kriterleri üzerinde etkili olan aşınma, maliyet ve verimlilik açısından da önemlidir. Aşınma mekanizmalarından biri veya birkaçı bir araya gelerek aşınma şekillerini oluşturmaktadır.

Bir torna kalemindeki aşınma şekilleri Şekil 5.13' de verilmiştir. Genel olarak, serbest yan yüzey, çentik, krater ve tali yan yüz aşınması olmak üzere dört aşınma şekli vardır [53].



Şekil 5.13. Torna kaleminde aşınma şekilleri.

Çentik aşınması

Yardımcı kesici kenarda çentik aşınması tipik bir adhezyon aşınması olmakla beraber, oksidasyon aşınma mekanizması ile büyüyebilmektedir. Çentik, kesici kenar ile iş parçası malzemesinin birleştiği yerde oluşmaktadır. Aşınma, havanın kesme bölgesine dahil olduğu talaş derinliğinin son noktasında yani kesme derinliği ile sınırlı bir alanda oldukça bölgesel olarak meydana gelmektedir [4].

Asıl kesici kenarda çentik oluşması mekanik yüklerin bir sonucu olmakta ve genellikle daha sert malzemelerin işlenmesi sırasında meydana gelmektedir [4].

Krater aşınması

Sürtünme ve difüzyon aşınma mekanizması ile meydana gelir. Krater aşınması talaş yüzeyinin kesici kenara paralel aşınarak çukurlaşmasıdır ve en sık rastlanan yüz aşınma tipidir. Kesici kenardan uzak derin ve geniş bir krater, kesici kenara yakın daha az derin ve dar kraterden daha tehlikesizdir. Bu nedenle krater derinliği K_T, takım ömrü kriteri olarak ilerlemeye bağlı verilir. (Şekil 5.13).

Çok yüksek kesme hızlarında kesici takım üzerinde meydana gelen yüksek sıcaklığın neden olduğu ısıl yumuşamadan dolayı takım yüzeyi oldukça hızlı aşınır [51].

Serbest (yan) yüzey aşınması

Esas olarak sürtünme aşınması yoluyla meydana gelir ve en genel aşınma şeklidir. Artan serbest yüzey ve uç kısımdaki aşınma, kenar geometrisinin bozulmasına, sürtünmenin artmasına ve yüzey kalitesinin bozulmasına sebep olur. Normal olarak serbest yüzey aşınma bölgesi, esas kesici kenarın düz kısmının orta bölgesi boyunca genellikle üniform genişliğe sahiptir [51].

Tali yan yüz aşınması

Tornada işlenen yüzey esas olarak takımın ucu ve tali kesme kenarı tarafından şekillendirilir. Bu nedenle aşınma ile takımın ucundaki değişme işlenen yüzeyin kalitesini etkiler. Küçük ilerlemelerin verildiği bitirme tornalamalarında bir kesme periyodu sonunda genellikle tali yanın üzerinde birkaç oluk oluşur. Bu oluklar işlenen yüzeyin pürüzlüğünü artırır [51].

Yüksek kesme hızlarında veya ilerlemelerde talaş kaldırırken artan sıcaklık, K_T veya VB_B aşınma kriterine ulaşılmadan tali yanın oksitlenmesi sonucu aşınmasına sebep olabilir [51].

6. TOZ METALURJİ TEKNİĞİYLE ÜRETİLEN METAL MATRİSLİ KOMPOZİT MALZEMELERİN İŞLENEBİLİRLİĞİ

Toz metalurjisi (TM) ürünü malzemelerin kullanımındaki artış sebebi ile verimliliği artırmak ve ücretleri düşürebilmek için işlenebilirlik çalışmaların önemi şiddetle artmaktadır. Zira, TM malzemeleri, hadde ve dökme malzemelerle karşılaştırıldığında genellikle daha kötü işlenebilirlik özelliği göstermektedir [53].

TM malzemeleri üretim işlemlerindeki parametreler, örneğin; tane boyutu ve geometrisi, gözeneklilik, sıkıştırma ve sinterleme yöntemleri, TM ürünü malzemelerin işlenebilirliklerini etkiler. Çoğu metalurjik değişimler, dövme (hadde) malzemelerin işlenebilirliklerinden daha çok TM malzemelerin işlenebilirliklerini etkiler [53].

TM işlenebilme özelliklerine, işlenecek parçadaki kimyasal kompozisyon, porozite, mikroyapı, üretim proses şartları ve işleme koşulları gibi parametreler direkt etki ettikleri için işlenebilirlik özelliklerin tespiti karmaşıklık arz eder [67].
TM malzemelerin kısmen kötü işlenebilirliği iyi bilinir. Araştırmacılar, TM parçalarının kötü işlenebilirlik özelliğini, ısıl iletkenlik teorisi, sert inklizyon teorisi ve aralıklı kesme teorisi esasına göre açıklanmışlardır [53]. Örneğin, süper alaşımların kullanım alanlarındaki avantajlar sağlayan özelliklerindeki artış, talaşlı işlenebilirlik özelliklerini o derece kötüleştirir. Yüksek sıcaklık dayanım özelliklerinden dolayı işleme sırasında dayanım özelliklerini korumaları, sert abrasiv karbürlerin ve oksitlerin varlığından dolayı kesici takımların abraziv aşınmaya maruz kalmaları, talaş kaldırma sıcaklıklarındaki aşırı artış sebebiyle kesici takımla kimyasal reaksiyona girmeleri, düşük ısıl iletkenlikleri sebebiyle kesici takımda yüksek ısıl gradyanların oluşması ve sünek matris sebebiyle işlenen yüzeyde aşırı pürüzlüklerin oluşması başlıca işlenebilirlik problemleridir [68].

Endüstriyel kesme, tornalama, frezeleme ve taşlama işlemleri TM yöntemiyle üretimiş MMK' ler için genellikle uygulanabilir. Fakat aşırı takım aşınma problemi ile sık sık karşılaşılır. Gözeneklilik, takımın kesici kenarı ile iş parçası arasında

süreksiz (kesintili) temasa sebep olur. Takım gözenekli malzeme boyunca geçerken titreşim, mikro darbeler oluşturur ve değişken yüklemeler sebebi ile takım aşınmasının artacağı düşünülür. Bu durum düşük yoğunluklu TM malzemelerin işlenmesi sırasında kesme bölgesinde daha yüksek miktarda ısı oluşturur. Bu sebeple, TM parçaların yüksek takım aşınmalarını etkin hale getirir. Gözeneklilikteki artış ile birlikte takım aşınma miktarlarının da artacağının önceden belirlenmiş olmasının yanında, aşınma miktarlarındaki bu artış bahsedilen sebeplerden dolayı artan sıcaklıkla birlikte kimyasal reaksiyonlar ve oksitlenme yoluyla aşınma da mümkündür. Sonuç olarak, TM parçalarda gözeneklerin varlığı, kesme kuvvetleri, takım aşınması, ısıl iletkenlik, kesme sıcaklıkları, talaş oluşumu ve oluşan yüzey kalitesini etkiler. TM parçaların işlenmesinde bu faktörler göz önüne alınmalıdır. Genellikle yoğunluğun artırılması işlenebilirliğin geliştirilmesi ile sonuçlanır. %100 yoğunluğa yaklaşan TM parçaların işlenebilirliğine, dövme parçaların işlenebilirlik değerlendirmeleri ile yaklaşılabilir [53].

Son yıllarda MMK malzemelerden alüminyum esaslı SiC yada Al_2O_3 saffil takviyeli kompozitler üzerinde yoğunlaşma görülmektedir. Bu iki seramik takviye elemanı, seramik kesici takımların bünyesinde mevcut olduğundan dolayı, bu malzemelerin işlenmesi güç olmaktadır. SiC yada Al_2O_3 parçacık takviyeli MMK' ler, sert takviye elemanına sahip olması nedeniyle yüksek takım aşınmasına yol açmaktadırlar. Bundan dolayı, kesme işlemi maliyeti bu MMK malzemelerin seçiminde belirleyici faktörler arsında yer almaktadır [53].

Genellikle benzer problemler, takviye malzemesinin boyutunun ve hacimsel oranının artmasıyla fazla önem kazanır. Daha fazla parçacık ve fiber takviye ile hacimsel oranı artan MMK' lerde kesici takım daha fazla sert malzeme ile karşılaşır ve bu takviye malzemeler kesilmeye karşı daha fazla direnç gösterirler. Bu sebeple daha yüksek rijitlikte takımlama yapılmalıdır. Partikül takviyeli MMK' ler için yüksek hız çelikleri veya tungsten karbür uçlar kullanılabilirken, aralıklı uzun fiber takviyeli MMK' ler için elmas uçlu veya kaplamalı takımlar gerekir. Takviye elemanının mukavemeti işlemeyi direkt etkiler. Örneğin; SiC (whiskers) takviyeli alüminyum işlenmesi daha zayıf fiber yapılı kompozitten daha zordur. Çoğu MMK' ler için en iyi

sonuçlar, yüksek ilerleme oranları, uygun kesme hızı ve soğutma sıvısı ve keskin takımlarla sağlanmıştır. Örneğin; AL/ SiC kompozitler için elmas takımlar, yüksek hızlarda seramik ve sert metal takımlardan daha iyi sonuçlar vermiştir. Ancak düşük kesme hızlarında sert metal uçlar kullanılacaksa takım ömrü artacaktır. Örneğin; Chanbers ve Stephens' in %15 SiC ve %5 saffil takviyeli Al- 5Mg kompozit malzemenin işlenmesi sırasında elde ettiği deney sonuçlarına göre; kesme hızı artıkça yan kenar aşınmasının arttığı gözlenmiş. En çok aşınma büyükten küçüğe sırasıyla K20, Al_2O_3 seramik, sialon ve K10 takımlarda olduğu görülmüş. İlerleme kuvvetinin artmasıyla da aşınmanın azaldığı görülmüş. En çok azalma K20 takımla işlemede gözlenmiş [69].

Bu sonuçlardan görülmektedir ki, kesme hızı arttıkça bütün takım malzemelerinde aşınma miktarı artmaktadır ve sert metal takımların aşınma direnci seramik takımlardan daha fazladır. Ancak bu aşınma oranları çok yüksektir. Bu yüksek aşınma oranlarına esas sebep abrazyon yoluyla yan yüzeyin aşınmasıdır. Abrazyon direnci sertlikle ilgilidir. Ancak sertliklerine göre düzenli bir aşınma sıralaması mevcut değildir. Çünkü en yumuşak K20 (1509 VSD) takımın SİALON takıma (1756 VSD) göre aşınma direnci daha fazladır. Bu durumla ilgili kimyasal aşındırıcıya ait bir belirti yok gibidir, ancak diğer faktörler (mikroyapısal v.b) abrasiv aşınma direncine katkıda bulunur [69].

Verilen bir talaş kaldırma hacmi için ilerleme oranındaki artış her iki takımın aşınmasını azalmıştır. İlerleme oranındaki artışla birlikte sağlanan talaş kaldırma miktarı ve takım ömründeki artış etkin bir avantajlı yoldur. Bu durumda genel olarak endüstriyel uygulamalarda düşük kesme hızı ve yüksek ilerleme değerlerinin seçimi uygun olacaktır [69].

SiC takviyeli alüminyum alaşımı kompozitin işlenebilirliğini inceleyen diğer bir araştırmacıya göre; SiC partikülleri boyut ve miktarındaki artış takımın aşınmasını artırmıştır. Aynı zamanda partikül boylarındaki artış yüzey kalitesini kötüleştirirken partikül miktarındaki artış yüzey kalitesini geliştirmiştir. Bu tür malzemenin işlenmesinde mümkün oldukça yüksek ilerleme oranı ve düşük kesme hızlarında sert

metal kullanımının uygun olacağı veya elmas kesici takımın kullanışlı olacağı belirtilmiştir [53].

Quan ve diğerlerinin yaptığı bir çalışmada; SiC parçacık takviyeli alüminyum matrisli kompozitlerin kesme işlemlerini ve talaş yapılarını incelemişler. Büyük ve küçük boyutlu SiC paçacık takviyeli kompozitlere kesme işlemi yapılarak birbirleriyle kıyaslanmışlardır. SiC takviye parçacıklarının boyutlarının bu kompozitlerin işlenebilirliği üzerinde çok belirgin bir etkiye sahip olduğu anlaşılmıştır. Büyük boyutlu parçacıklar, matrisin plastik deformasyonunu ciddi bir şekilde engellemişler ve bundan dolayı parçacık yakınlarında gerilim yoğunlaşması artmıştır. Büyük boyutlu parçacıklarda daha fazla hata meydana gelmiş ve daha fazla sınır hatalarına neden olmuştur. İşlenmiş yüzeylerde büyük oranda değişik hatalar meydana gelmiş ve etkilenen derinlik büyük olmuştur. Sonuç olarak; büyük boyutlu SiC parçacık takviyeli kompozitler, çok zayıf bir işlenebilirlik göstermiştir. Daha küçük boyutlu parçacık takviyeli kompozitlerde, takım ömrü uzamış ve daha yüksek kesme hızlarına müsaade edilmiştir [70].

Takviye parçacıklarının boyutunun yada hacminin artmasıyla, kompozit talaşlarının deformasyon katsayısı azalmış ve kesme açısı artmıştır. Büyük boyutlu SiC parçacıklarıyla takviye edilmiş kompozitlerin işlenmesinde, sürekli talaş ve küçük parçacıkların her ikisi de bulunurken, diğer tarafta küçük boyutlu SiC parçacık takviyeli kompozitlerin işlenmesinde çoğunlukla sürekli talaşlar oluşmuştur [70].

Al_2O_3 takviyeli alüminyum alaşımı kompozitin işlenebilirliğini inceleyen diğer bir araştırmacıya göre de; Al_2O_3 takviyeli kompozit malzemelerin sertlikleri, partikül hacim oranının artması ve partikül boyutunun azalmasıyla artmıştır. Buna bağlı olarak partikül boyutu ve oranının artmasıyla takım ömrü azalmıştır. Büyük boyutlu partikül ile yüksek hacim oranlarında işlenebilirlik daha kötüleşmiştir [4].

Al_2O_3 partikül boyutunun artmasıyla, kompozitlerdeki yüzey pürüzlülük değerleri artmasıyla. Ayrıca takviye elemanı Al_2O_3 partikül oranının artmasıyla yüzey pürüzlülük değeri azaldığı belirtilmiştir [4].

7. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

7.1. Malzeme

Bu çalışmada, ECKA alüminyum AS 91/s kodlu malzemesi, matris malzemesi olarak kullanılmıştır. Özellikleri Çizelge 7.1' de verilmiştir.

Çizelge 7.1. Matris malzemesi olarak kullanılan alüminyum tozunun özellikleri

Malzeme	Üretim Yöntemi	Toz Tane Boyutu (μm)	Saflık Oranı (%)
Alüminyum	Gaz Atomizasyonu	-200	99,9

Takviye elemanı olarak kullanılan α-Si_3N_4 seramik tozunun özellikleri ise Çizelge 7.2' de verilmiştir.

Çizelge 7.2. α-Si_3N_4 seramik tozunun özellikleri

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

7.2. Numunelerin Hazırlanması

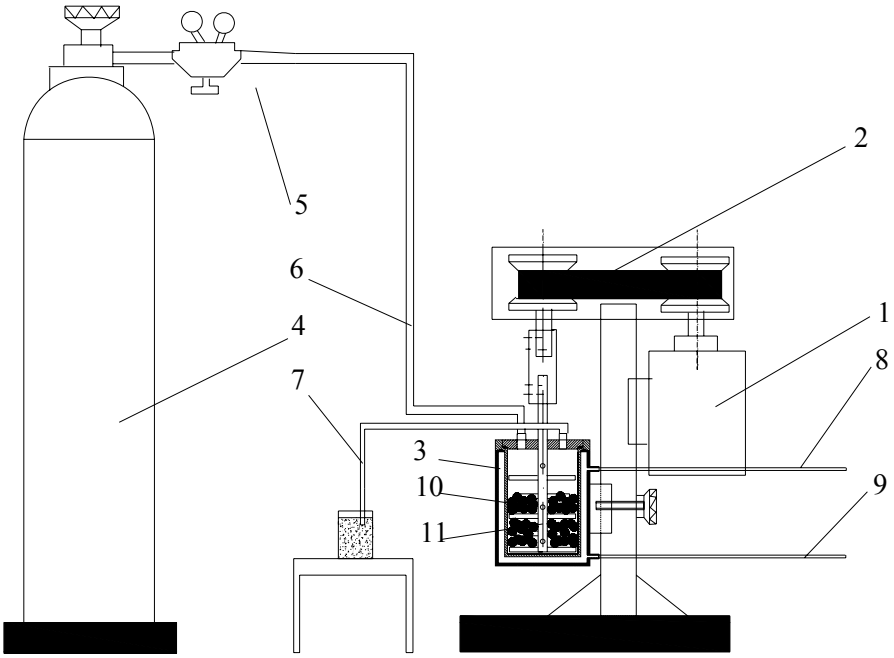
7.2.1. Yüksek enerjili atritörde karıştırma

Tozların tartı işlemleri Sartorius marka 0,1 mg hassasiyetteki terazide yapılmıştır. Karıştırma işlemi, Gazi Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Metal Eğitimi Bölümü laboratuarlarında Union Process marka düşey tip (szegvari) atritörde gerçekleştirilmiştir. Ağırlıkça %5, %10 ve %15 oranlarındaki α-Si_3N_4, alüminyum tozu ile karıştırılmıştır. Matris malzemesi ile seramik takviyenin homojen karışımını sağlamak amacıyla yüksek enerjili atritörde karıştırma işlemi bir saat süreyle, 450dev/ dak' da yapılmıştır. Karıştırma şartları Çizelge 7.3' te verilmiştir.

Çizelge 7.3. Karıştırma şartları

Numune kodu	% Al (ağırlıkça)	% α-Si_3N_4 (ağırlıkça)	Al (gr)	α-Si_3N_4 (gr)	Yağlayıcı (gr)
%5 Si_3N_4	95	5	47,5	2,5	0,75
%10 Si_3N_4	90	10	45	5	0,75
%15 Si_3N_4	85	15	42,5	7,5	0,75

Alüminyum tozların bilyalara ve karıştırma tankının yan yüzeylerine sıvanmasını önlemek için yağlayıcı olarak % 1,5 oranında çinko stearat kullanılmıştır. Karıştırma işleminde Ø10 mm çapında 350 gr paslanmaz çelik bilya kullanılmıştır. Her karıştırma işleminde tank içerisine 50 gr karışım toz yüklenmiştir. Karışım sırasında bilyaların, birbirleriyle ve tank yüzeyi ile çarpmaları sonucunda sürtünmeden dolayı ısı açığa çıkacağından sistem sürekli su ile soğutulmuştur. Şekil 7.1' de karıştırma yapılan atritörün şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 7.1. Yüksek enerjili atritörün şematik gösterimi. 1) Motor, 2) Kasnak-kayış sistemi, 3) Atritör tankı, 4) Argon tüpü, 5) Manometre, 6) Gazın giriş hortumu, 7) Gaz çıkış hortumu, 8) Soğutma suyu hortumu (çıkış), 9) Soğutma suyu girişi, 10) Bilya, 11) Şaft kolu.

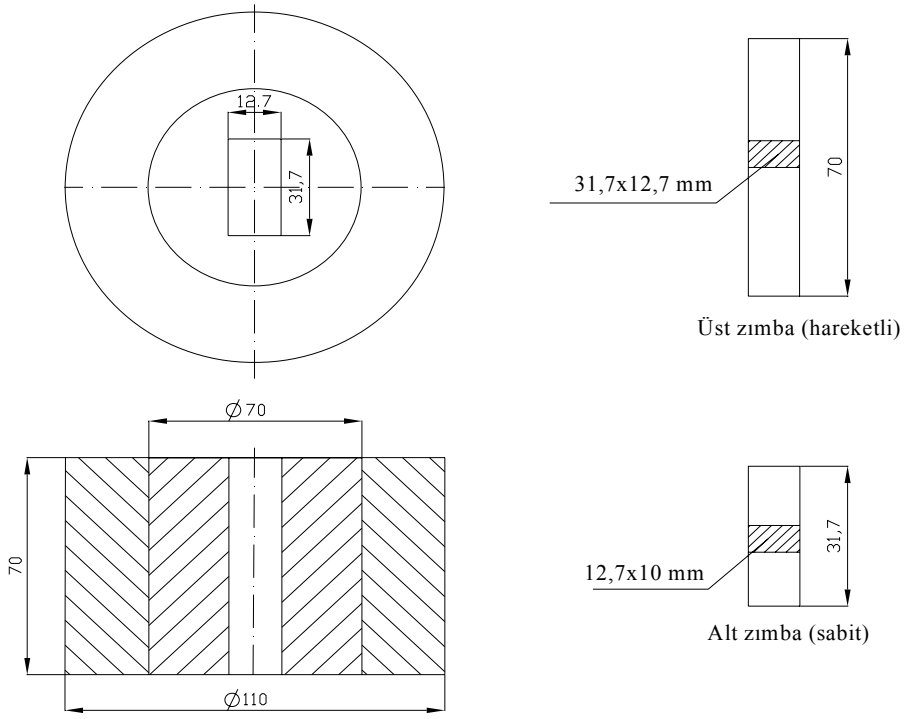
7.2.2. Karışım tozların karakterizasyonu

Kompozit üretiminde kullanılan karışım Al-Si_3N_4 tozları Malvern Master Sizer-E Ver. 1.2b cihazında toz tane boyut dağılımları 3 dak ultrason da ölçülmüştür. Hazırlanan karışım tozları soğuk gömme ile reçineye alınarak optik mikroskop vasıtasıyla toz tane şekilleri incelenmiştir.

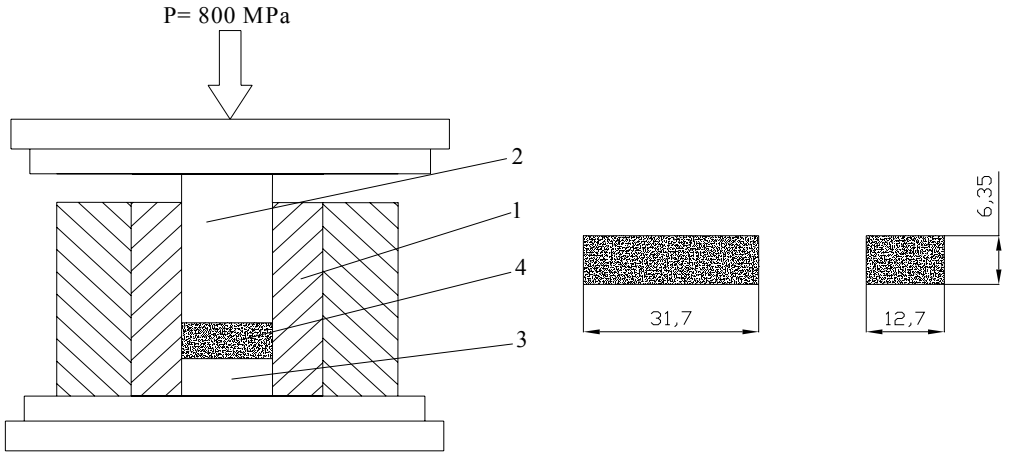
7.2.3. Tozların preslenmesi

Karışım tozların preslenmesi, G.Ü.M.M.F laboratuarların da 80 ton çekme/basma kapasiteli DARTEC marka cihazda 800 MPa presleme basıncında yapılmıştır. İki farklı geometride numune üretilmiştir. Birincisi, ASTM B 312' ye göre preslenen çapraz kırılma numuneleridir (Şekil 7.2) [71]. Boyutları 31,7x12,7x6,35 mm olacak şekilde tek yönlü presleme kalıbında preslenmiştir (Şekil 7.3). İkincisi ise

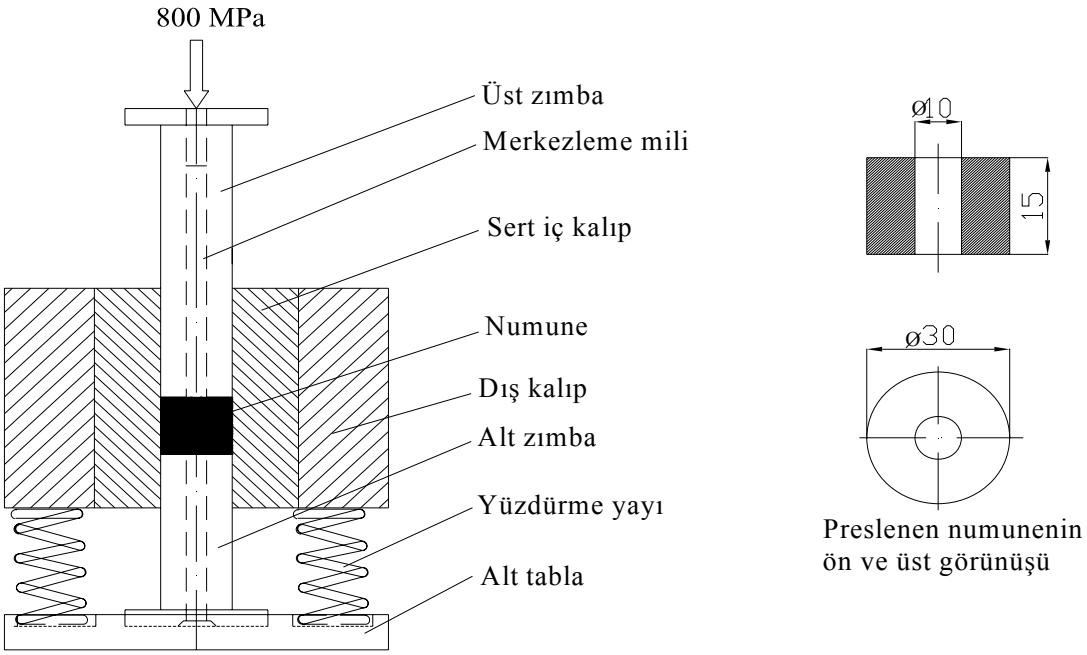
işlenebilirlik numuneleridir (Şekil 7.4). Bu numuneler, çift taraflı presleme ile daha homojen parça üretebilen yüzer kalıp kullanılarak yapılmıştır.



Şekil 7.2. Çapraz kırılma numunelerinin preslenmesinde kullanılan kalıp ve zımbalar.



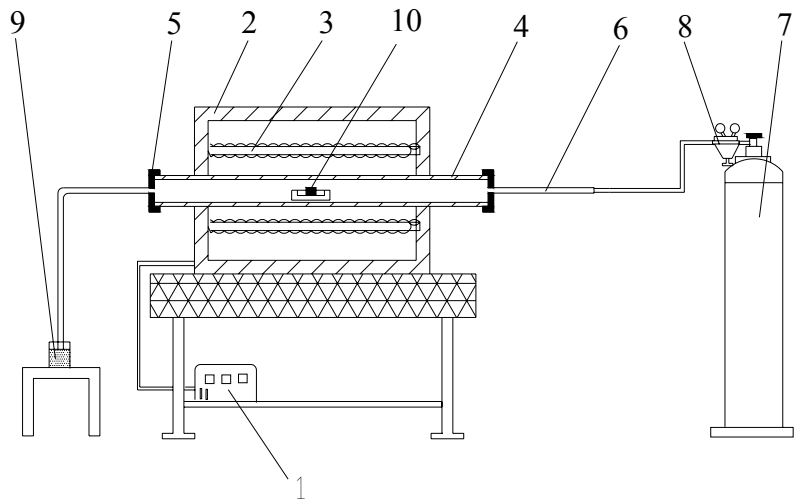
Şekil 7.3. Çapraz kırılma numunesinin preslenmesini gösteren şematik resim. 1) Sert iç kalıp, 2) Üst zımba, 3) Alt zımba, 4) Numune.



Şekil 7.4. İşlenebilirlik numunelerini preslemede kullanılan kalıbın şekli ve preslenmiş numunenin ön ve üst görünüşü.

7.2.4. Sinterleme

Sinterleme işlemleri, G.Ü.T.E.F, Metal Eğitimi Bölümü, Ekstraktif Metalurji laboratuarın da bulunan SFL marka 1400 ^{o}C kapasiteli tüp fırında, azot gazı ortamında yapılmıştır. Şekil 7.5' te tüp fırınında yapılan sinterleme işleminin şematik gösterimi verilmiştir. Sinterleme işlemi, 280°C 'de 2 saat yağlayıcı uçurma işlemi sonunda 650 ^{o}C ' de 2 saat süreyle yapılmıştır.



Şekil 7.5. Sinterleme fırınının şematik gösterimi. 1) Kontrol paneli, 2) Fırın, 3) Resistans, 4) Alümina tüp, 5) Grafit kapak, 6) Plastik hortum, 7) Argon tüpü, 8) Manometre, 9) Gaz çıkış kabı, 10) Numune kayığı ve numune.

7.2.5. Yoğunluk hesaplamaları

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

$$\rho_{karışım} = [(\%W)_1 \times \rho_1] + [(\%W)_2 \times \rho_2] + \ldots\ldots\ldots + [(\%W)_n \times \rho_n] \quad (7.1)$$

Burada;

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

$(\%W)_n$: her bir bileşenin karışım içerisindeki ağırlıkça yüzdesi,

ρ_n : her bir bileşenin yoğunluğudur.

Yoğunluk kitiyle yoğunluk ölçme aşağıdaki gibi yapılmıştır;

- ✓ Numunenin havadaki ağırlığı üst kefede ölçülerek (W)
- ✓ Numune kaldırılmadan darası alınır.

✓ Numune su içindeki alt kefeye konarak tartılır (G)

✓ Havadaki ağırlık değeri sudaki ağırlık değerine bölünür ve suyun sıcaklığına göre katologtan alınan katsayı (Rho) ile çarpılarak numunenin yoğunluğu bulunur.

$$\rho_{gerçek} = W \div G \times Rho\ (g/cm^3) \quad (7.2)$$

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

$$\rho_{karışım}\ (\%) = (Gerçek\ yoğunluk \div Teorik\ yoğunluk) \times 100 \quad (7.3)$$

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

7.2.6. Sertlik ölçümleri

Sertlik ölçümleri vickers sertlik ölçüm yöntemi kullanılarak INSTRON WOLPERT marka GmbH Diastestor 7551 tipi sertlik ölçüm cihazında ile 5 Kg' lık (HV 5) yük altında gerçekleştirilmiştir. Her numuneden beşer ölçüm alınarak ortalamaları sertlik değeri olarak kullanılmıştır.

7.2.7. Çapraz kırılma deneyi

Sinterleme sonrası çapraz kırılma numunelerin mukavemetlerini belirlemek için ASTM B 312' ye uygun ölçüde numune elde etmek için sırsıyla 400#, 600#, 800# ve 1200# numaraya kadar yüzeylerinde herhangi bir çentik, çizik vb. kusurların kalmamasına dikkat edilerek zımparalanmış ve keçe ile 3 μm elmas pasta kullanılarak yüzeyi parlatılmıştır. Parlatılan numuneler Şekil 7.6' te şematik olarak verilen standart çapraz kırılma deney aparatında kırılma deneyine tabi tutulmuştur. Kırma

işlemi 0,060 kN/saniye yükleme hızıyla ELE marka hidrolik preste gerçekleştirilmiştir.

Numunelerin çapraz kırılma mukavemetleri (ÇKM) aşağıda verilen standart formül ile hesaplanmıştır.

$$ÇKM = \frac{3.P.L}{2.t^2.w} \text{ (MPa)}$$

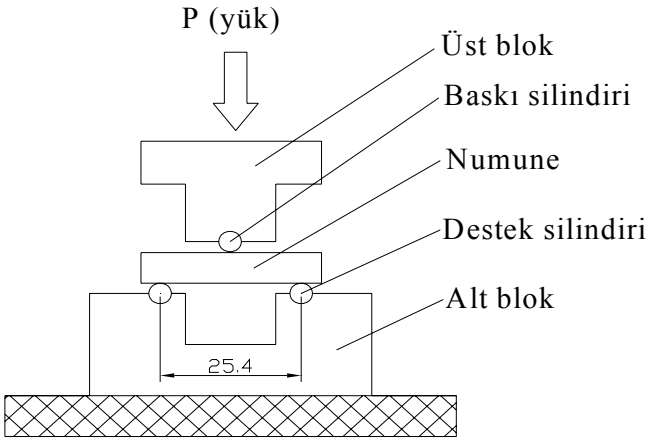
P: Deney parçasının kırıldığı andaki yük (N)

L: Destekler arası uzaklık (25,4 $\pm$ 3 mm)

t: Deney parçasının yüksekliği (6,35 mm)

w: Deney parçasının genişliği (12,70 mm)

ÇKM: Çapraz kırılma mukavemeti (MPa)



Şekil 7.6. Çapraz kırılma deney aparatının şematik gösterimi.

7.3. İşlenebilirlik Özelliklerinin Belirlenmesi

7.3.1. Kesici uç ve kater seçimi

Talaş kaldırma ile ilgili bütün deneylerde kesici uç ve kater TS 10329' te belirtilen standart şartlara uygun seçilmiştir [72]. İşlenebilirlik deneylerinde Tungsten karbür (WC (K10)) ve Çok kristali elmas (PCD) uçlar kullanılmıştır. Kullanılan takımın geometrisi sırasıyla Şekil 7.7 ve Şekil 7.8' de gösterilmiştir.

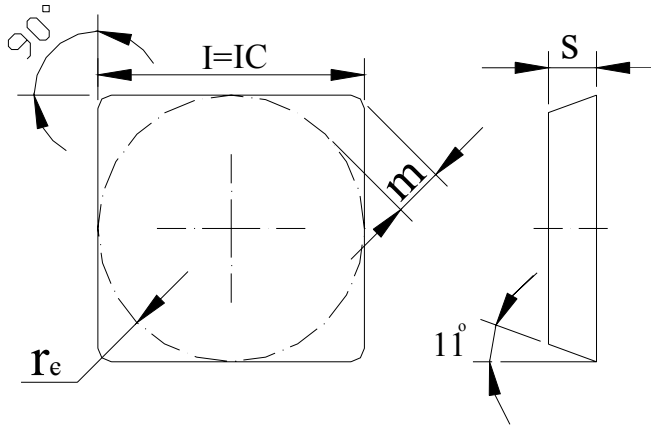
Kısa İşareti: SPGN 120304

I = d = 12,7±0,025 mm

s = 3,18±0,13 mm

r = 0,8±0,1 mm

m = 2,30±0,025 mm



Şekil 7.7. Mekanik sıkmalı K10 kesici ucun standart geometrisi ve ölçüleri.

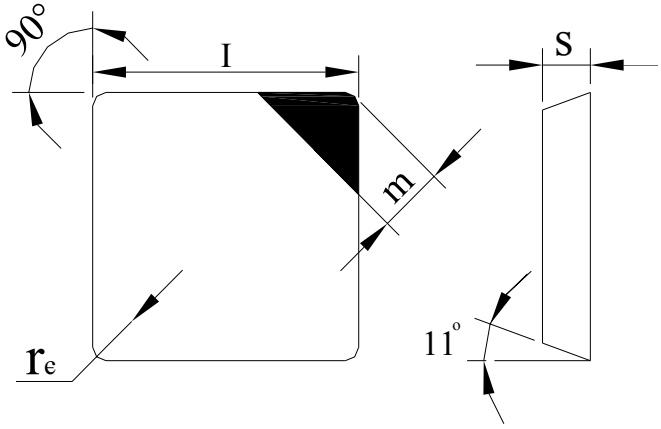
Kısa İşareti: SPGN 120304

I = 12,7±0,025 mm

s = 3,18±0,13 mm

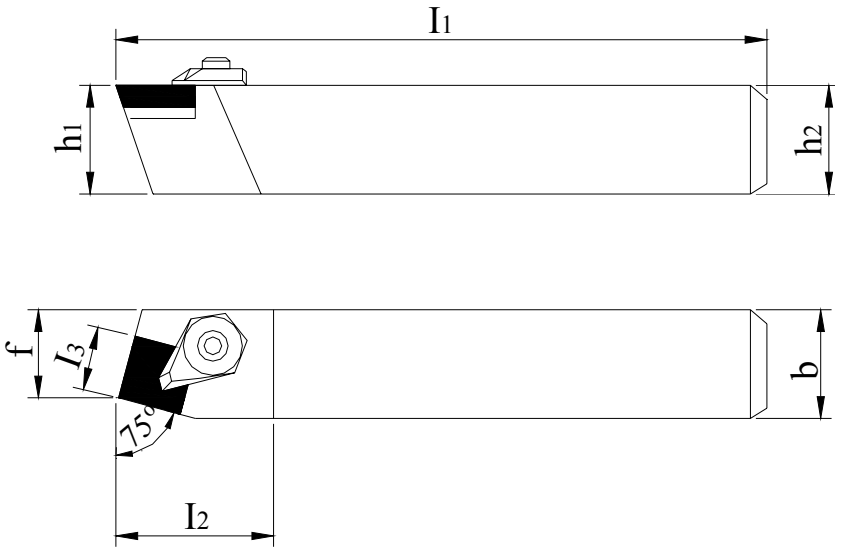
r = 0,4±0,1 mm

m = 2,30±0,025 mm



Şekil 7.8. Mekanik sıkmalı PCD kesici ucun standart geometrisi ve ölçüleri.

Seçilen uç geometrisine uygun olacak şekilde CSBPR 25x25 L12 geometrisinde SECO kater kullanılmıştır (Şekil 7.9).



Şekil 7.9. Kater açıları ve ölçüleri ($h_1 = h_2 = 25$ mm, $I_1 = 150$ mm, $I_2 = 32$ mm, $I_3 = 12.7$ mm, b = 25 mm, f = 22 mm).

7.3.2. Talaşlı işleme deneyleri

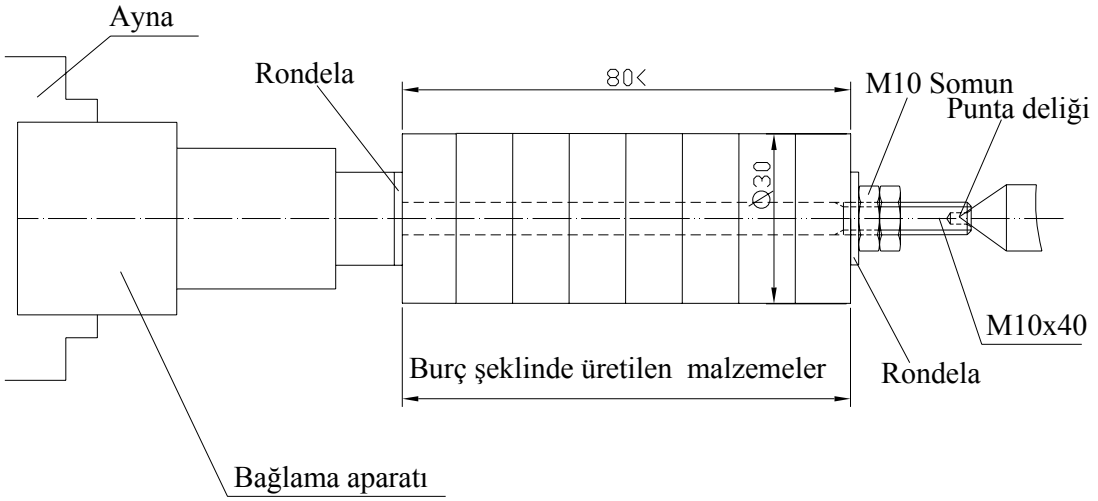
Üretilen numunelerin talaşlı işleme deneylerinde kullanılan işleme şartları Çizelge 7.4' te belirtilmiştir.

Çizelge 7.4. Talaşlı işleme parametreleri ve takım geometrisi

Talaşlı işleme parametreleri		Takım geometrisi	
Kesme hızı (V)	50 m/dak, 100 m/dak, 150 m/dak, 200 m/dak	Talaş açısı	6°
İlerleme (f)	0,12 mm/dev	Boşluk açısı	5°
Talaş derinliği (a)	1 mm	Geri talaş açısı	0°
Kesici uç ve kater özellikleri		Ayar açısı	75°
Kesici uç	K10- SPGN 120304 PCD- SPGN 120304	Uç açısı	90°
Kater	CSBPR 25X25	Uç yarıçapı	0,4 mm

7.3.3. Numunelerin bağlanması

Üretilen burç şeklindeki Al ve MMK numuneleri işlemede, tezgaha bağlamada kolaylık ve ekonomik olarak işlememize olanak sağlayacak şekilde bir bağlama aparatı tasarlanmış ve imalatı yapılmıştır (Şekil 7.10).



Şekil 7.10. Bağlama aparatına, üretilen malzemelerin yerleştirilmesi.

7.3.4. Kesme kuvvetleri ölçümü

Sinterlenmiş burç şeklindeki MMK numuneler, aparat üzerine yerleştirildikten sonra CNC torna tezgahına bağlanarak talaş kaldırma işlemine uygun hale getirilmiştir. Tornalama işlemleri, G.Ü. Teknik Eğitim Fakültesi, Makine Bölümünde bulunan Johnford TC-35 marka CNC tezgahında yapılmıştır. Kesici takıma etkiyen tornalama kuvvetlerini ölçmek için Kistler 9257B tip (üç kuvvet bileşenini de ölçebilen) bir piezoelektrik dinamometre kullanılmıştır. İşleme başlamadan önce 1000 dev/dak hızında yüzey temizleme tornalaması yapılmıştır. Yapılan çalışmada; dört farklı malzeme (Al, Al + %5 Si_3N_4, Al + %10 Si_3N_4, Al + %15 Si_3N_4), dört farklı kesme hızı (50, 100, 150, 200 m/dak) ve iki farklı takım (K10 ve PCD) kullanılmıştır. Her bir kuvvet ölçümden sonra uç değiştirilmiştir. Bütün talaş kaldırma işlemlerinde talaş derinliği a =1 mm ve ilerleme f = 0.12 mm/dev olarak sabit tutulmuştur. İlerleme değeri TS 10329' daki kesme şartlarına göre belirlenmiştir [72].

7.3.5. Yüzey pürüzlülüğü ölçümü

Kesme kuvveti ölçümü yapılmış olan MMK numuneler aparat üzerinden sökülmeden işlenmiş yüzeylerden yüzey pürüzlülüğü ölçülmüştür. Ölçümler portatif bir yüzey pürüzlülük cihazı olan Mahr GmbH Perthometer M1/ M1 CNOMO cihazında yapılmıştır. Yapılan ölçümde; dört farklı numune (Al, Al + %5 Si_3N_4, Al + %10 Si_3N_4, Al + %15 Si_3N_4), dört farklı kesme hızı (50, 100, 150, 200 m/dak) ve iki farklı takım (K10 ve PCD) kullanılan işlenmiş yüzeylerden ayrı ayrı ölçüm yapılmıştır. Pürüzlülük ölçümünde örnekleme uzunluğu (λ_c) 0,8 mm ve ölçüm uzunluğu (λ_c) 5,6 mm seçilmiştir. İşlenen her bir bölgeden 5' er yüzey pürüzlülüğü ölçümü alınmış ve bunların ortalama Ra değerleri belirlenmiştir. Hesaplanan ortalama yüzey pürüzlülük değerlerinin (Ra) kullanılan kesici uca ve kesme hızına göre değişimleri grafiksel olarak belirlenmiştir.

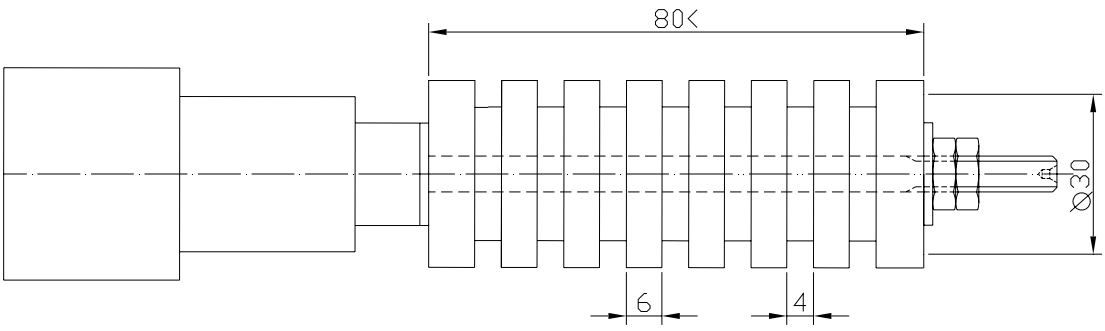
7.3.6. Talaş köklerinin hazırlanması ve talaş oluşumunun incelenmesi

Yeni üretilen veya geliştirilen bir malzemenin işlenebilirliğini belirleyen faktörlerden biri de talaş oluşum mekanizmasıdır. Talaş kaldırma anında meydana gelen birincil ve ikincil deformasyon bölgesindeki plastik deformasyon davranışı ve takım ucunda yığılma oluşumu gibi komplex davranışların incelenebilmesi gerekir. Ancak kesme anında herhangi bir hızda dönme eylemi içinde olan takım – iş parçası ikilisi bu oluşumu gözlemeye ve incelemeye fırsat vermemektedir [51].

Bu tip incelemeler için en uygun sistem Ani Durdurma Aparatı (ADA) dır. ADA' nın çalışma prensibi dönme esnasında dıştan uygulanan bir kuvvetle takımın parçadan ani uzaklaştırılması esasına dayanır [73].

Bu çalışmada; G.Ü.T.E.F. Metal Eğitimi bölümünde imal edilmiş olan ani durdurma aparatı kullanılmıştır [51]. Aparat, TEZSAN marka SN 50 endüstriyel tip tornaya bağlanarak çıkartılmıştır. Şekil 7.11' de gösterilen 6 mm lik kısımlardan 2- 4 sn' lik kesme işlemi sonunda takım kesme pozisyonundan düşürülmüş ve talaş kökünün parça üzerinde kalması sağlanmıştır. Bütün numuneler 50 ve 100 m/dak kesme

hızında, PCD ve K10 takımla tornalanması sırasında talaş kökleri çıkarılmıştır. Daha sonra, parça üzerinde kalan talaş kökü el testeresiyle kesilerek parçadan alınıp epoksi reçineye gömülmüştür. Gömme işlemi yapılan talaş kökleri metalografik inceleme için hazır hale getirilmiştir. Keller çözeltisi ile 20- 100 sn değişen sürelerde dağlanan talaş kökleri optik mikroskobu vasıtasıyla incelenmiştir.



Şekil 7.11. Talaş kökü çıkarmak için kullanılan düzenek.

7.3.7. Yığıntı talaş faktörünün (r) belirlenmesi

Al ve MMK numunelerin tornalama sırasında çıkan talaşların kalınlığı (t_c), 1/100 hassasiyetindeki mikrometre ile ölçülmüştür. Al, % 5, % 10 ve % 15 Si_3N_4 numunelerin işlenmesiyle çıkan talaşlardan, her biri için 5 farklı talaş ölçülmüştür. Her numuneden ölçülen 5 talaş kalınlığının ortalaması hesaplanmıştır. Yığıntı talaş faktörü (r) aşağıdaki formül ile, her malzeme için belirlenen t_c ve t değerleri yerleştirilerek hesaplanmıştır [74].

$$r = \frac{t}{tc}$$

r : Yığılma faktörü.

t : Deforme edilmemiş talaşın kalınlığı (a).

tc : Deforme olmuş talaş kalınlığı (Çıkan talaş kalınlığı)

7.4. Metalografik incelemeler

Metalografik çalışmalar G.Ü.T.E.F, Metal Eğitimi laboratuarlarında bulunan 1000 büyütme kapasiteli LEICA DM4000M marka dijital mikroskopta ve tarama elektron mikroskop (SEM) incelemeleri ise JEOL JSM-6060LV marka elektron mikroskopta yapılmıştır. Yapılan bütün çalışmalarda incelenecek numune yüzeyleri sırasıyla 400, 800 ve 1200 mesh' lik su zımparası ile zımparalandıktan sonra 3 μm' luk keçe ve 3 μm' luk elmas solüsyonla parlatılmıştır. Parlatılan numuneler KELLER (1 ml HF, 1,5 ml HCI, 2,5 ml HNO_3, 95 ml H_2O) dağlayıcısı ile normalden uzun 20- 100 sn arasındaki değişen sürelerde dağlanmıştır.

8. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

8.1. Malzeme

8.1.1. Al ve Si_3N_4 tozların boyut analizleri

Deneylerde matris malzemesi olarak kullanılan %99,9 saflıktaki gaz atomize Al tozunun toz tane boyut dağılımı Şekil 8.1' de verilmiştir. Ortalama toz tane boyutu 98,43 µm olarak ölçülmüştür. Toz dağılımında %10' unun ortalama toz tane boyutu d(0.1)=42,49 µm ve %90' ının toz tane boyutu d(0.9)=178,69 µm olarak ölçülmüştür.

Presentation: 2OHD
Polydisperse model

Volume Result

Focus = 300 mm.

Residual = 0.414 %
d (0 .5) = 98.43 µm
D [4, 3] = 121.65 µm
Sauter Mean (D[3,2]) = 66.44 µm
Specific Surface Area = 0.0903 sq. m. / gm

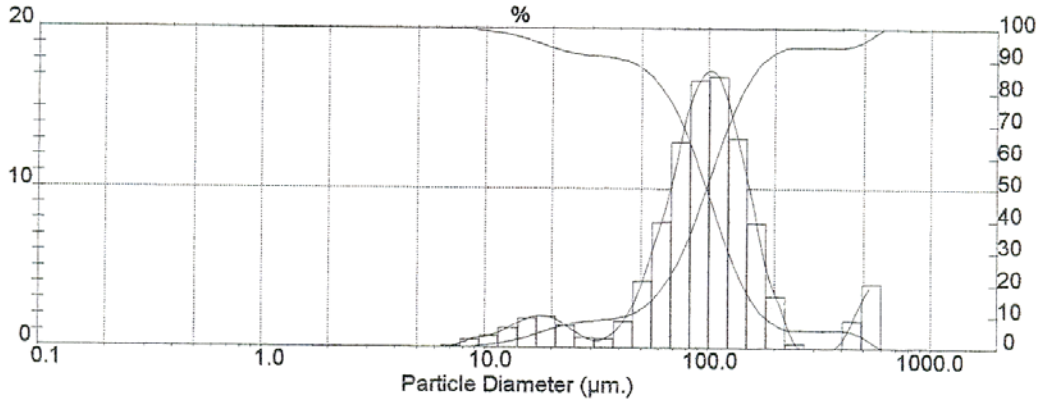
Concentration = 0.136 %
d (0.1) = 42.49 µm
Span = 1.38

Obscuration = 13.95 %
d (0.9) = 178.69 µm

Mode = 103.57 µm
Density = 1.00 gm. / c.c.

Size (Lo) µm	Result In %	Size (Hi) µm	Result Below %
0.50	0.00	1.32	0.00
1.32	0.00	1.60	0.00
1.60	0.00	1.95	0.00
1.95	0.00	2.38	0.00
2.38	0.00	2.90	0.00
2.90	0.00	3.53	0.00
3.53	0.00	4.30	0.00
4.30	0.00	5.24	0.00
5.24	0.00	6.39	0.00
6.39	0.12	7.78	0.12
7.78	0.52	9.48	0.64
9.48	0.76	11.55	1.40
11.55	1.27	14.08	2.68
14.08	1.84	17.15	4.51
17.15	1.98	20.90	6.50
20.90	1.43	25.46	7.93

Size (Lo) µm	Result In %	Size (Hi) µm	Result Below %
25.46	0.67	31.01	8.60
31.01	0.59	37.79	9.19
37.79	1.71	46.03	10.90
46.03	4.19	56.09	15.09
56.09	7.90	68.33	22.99
68.33	12.92	83.26	35.91
83.26	16.77	101.44	52.67
101.44	16.96	123.59	69.63
123.59	13.17	150.57	82.80
150.57	7.85	183.44	90.65
183.44	3.24	223.51	93.89
223.51	0.33	272.31	94.22
272.31	0.00	331.77	94.22
331.77	0.03	404.21	94.25
404.21	1.73	492.47	95.98
492.47	4.03	600.00	100.01



Şekil 8.1. %99,9 saflıktaki Al tozunun toz tane boyut dağılımı.

% 5 Si_3N_4 içeren mekanik karıştırmanın toz tane boyutuna önemli bir etkisi olmadığı anlaşılmaktadır. % 5 Si_3N_4 içeren karışım tozun ortalama toz boyutu d(0.5)=93,67 µm olarak ölçülmüştür (Şekil 8.2).

Presentation: 2OHD
Polydisperse model

Volume Result

Focus = 300 mm.

Residual = 1.389 %
d (0 .5) = 93.67 µm
D [4, 3] = 109.20 µm
Sauter Mean (D[3,2]) = 56.17 µm
Specific Surface Area = 0.1068 sq. m. / gm

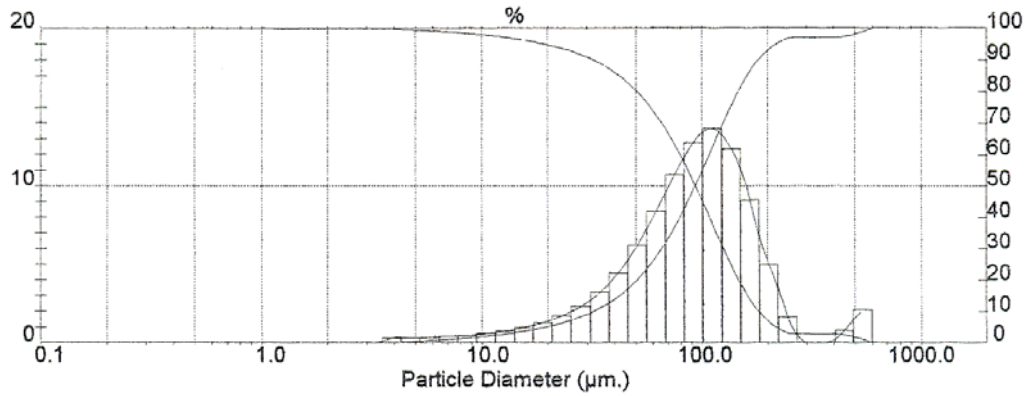
Concentration = 0.192 %
d (0.1) = 31.86 µm
Span = 1.59

Obscuration = 22.28 %
d (0.9) = 180.95 µm

Mode = 110.48 µm
Density = 1.00 gm. / c.c.

Size (Lo) µm	Result In %	Size (Hi) µm	Result Below %
0.50	0.00	1.32	0.00
1.32	0.00	1.60	0.00
1.60	0.00	1.95	0.00
1.95	0.00	2.38	0.00
2.38	0.00	2.90	0.00
2.90	0.00	3.53	0.00
3.53	0.32	4.30	0.33
4.30	0.31	5.24	0.64
5.24	0.36	6.39	1.00
6.39	0.43	7.78	1.43
7.78	0.49	9.48	1.91
9.48	0.61	11.55	2.53
11.55	0.76	14.08	3.29
14.08	0.99	17.15	4.28
17.15	1.30	20.90	5.58
20.90	1.72	25.46	7.30

Size (Lo) µm	Result In %	Size (Hi) µm	Result Below %
25.46	2.32	31.01	9.62
31.01	3.19	37.79	12.82
37.79	4.48	46.03	17.29
46.03	6.21	56.09	23.50
56.09	8.37	68.33	31.88
68.33	10.72	83.26	42.59
83.26	12.75	101.44	55.35
101.44	13.66	123.59	69.01
123.59	12.36	150.57	81.37
150.57	9.10	183.44	90.46
183.44	4.97	223.51	95.44
223.51	1.66	272.31	97.10
272.31	0.02	331.77	97.12
331.77	0.01	404.21	97.14
404.21	0.78	492.47	97.92
492.47	2.08	600.00	100.00



Şekil 8.2. % 5 Si_3N_4 içeren kompozit tozunun toz tane boyut dağılımı.

%10 Si_3N_4 ve %15 Si_3N_4 içeren karışımlarda toz tane boyutu Şekil 8.3 ve Şekil 8.4' de verilmiştir. %10 Si_3N_4 içeren karışımın toz boyutu d(0.5)=77,52 µm ve %15 Si_3N_4 içeren karışımın toz boyutu ise d(0.5)=64,47 µm olarak ölçülmüştür. Karıştırma süresi sabit olmasına rağmen artan Si_3N_4 oranıyla birlikte karışım toz tane boyutunda azalma belirlenmiştir (Şekil 8.5). Bu durum, yaklaşık 0,1- 0,3 µm boyutlarındaki Si_3N_4 oranının atritörde mekanik karıştırma sırasında, Al tozlarının deformasyonla

kırılma etkisine ve Si_3N_4 toz oranının artırmış olmasına bağlanabilir [14, 75].

Presentation: 2OHD
Polydisperse model

Volume Result

Focus = 300 mm.

Residual = 0.440 %
d (0 .5) = 77.52 µm
D [4, 3] = 99.83 µm
Sauter Mean (D[3,2]) = 31.88 µm
Specific Surface Area = 0.1882 sq. m. / gm

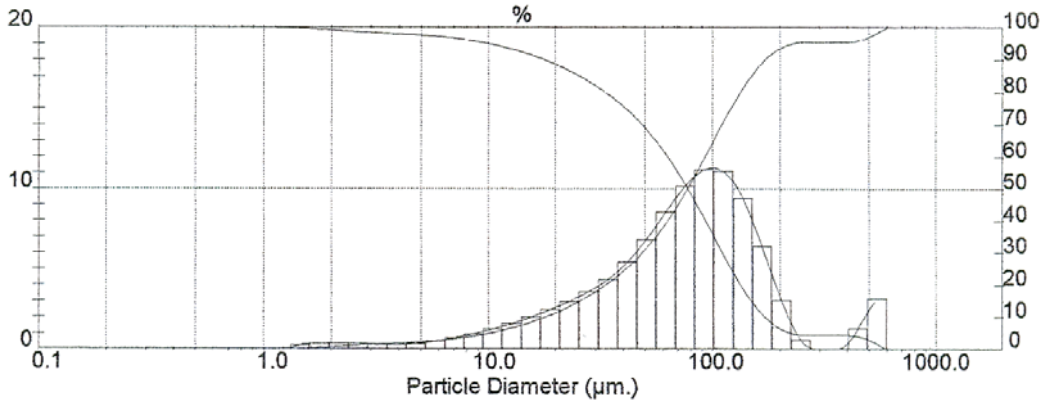
Concentration = 0.232 %
d (0.1) = 18.01 µm
Span = 1.97

Obscuration = 42.67 %
d (0.9) = 170.63 µm

Mode = 101.44 µm
Density = 1.00 gm. / c.c.

Size (Lo) µm	Result In %	Size (Hi) µm	Result Below %
0.50	0.09	1.32	0.09
1.32	0.26	1.60	0.35
1.60	0.36	1.95	0.71
1.95	0.38	2.38	1.10
2.38	0.35	2.90	1.44
2.90	0.30	3.53	1.74
3.53	0.30	4.30	2.04
4.30	0.37	5.24	2.41
5.24	0.52	6.39	2.92
6.39	0.73	7.78	3.65
7.78	0.96	9.48	4.61
9.48	1.25	11.55	5.86
11.55	1.59	14.08	7.45
14.08	1.99	17.15	9.44
17.15	2.47	20.90	11.91
20.90	2.99	25.46	14.90

Size (Lo) µm	Result In %	Size (Hi) µm	Result Below %
25.46	3.59	31.01	18.49
31.01	4.36	37.79	22.85
37.79	5.42	46.03	28.27
46.03	6.85	56.09	35.13
56.09	8.54	68.33	43.67
68.33	10.16	83.26	53.83
83.26	11.20	101.44	65.04
101.44	11.11	123.59	76.15
123.59	9.40	150.57	85.55
150.57	6.40	183.44	91.95
183.44	3.03	223.51	94.98
223.51	0.58	272.31	95.57
272.31	0.00	331.77	95.57
331.77	0.02	404.21	95.59
404.21	1.28	492.47	96.87
492.47	3.13	600.00	100.00



Şekil 8.3. %10 Si_3N_4 içeren kompozit tozunun toz tene boyut dağılımı.

Presentation: 2OHD
Polydisperse model

Volume Result

Focus = 300 mm.

Residual = 0.369 %
d (0 .5) = 64.47 µm
D [4, 3] = 78.60 µm
Sauter Mean (D[3,2]) = 23.57 µm
Specific Surface Area = 0.2545 sq. m. / gm

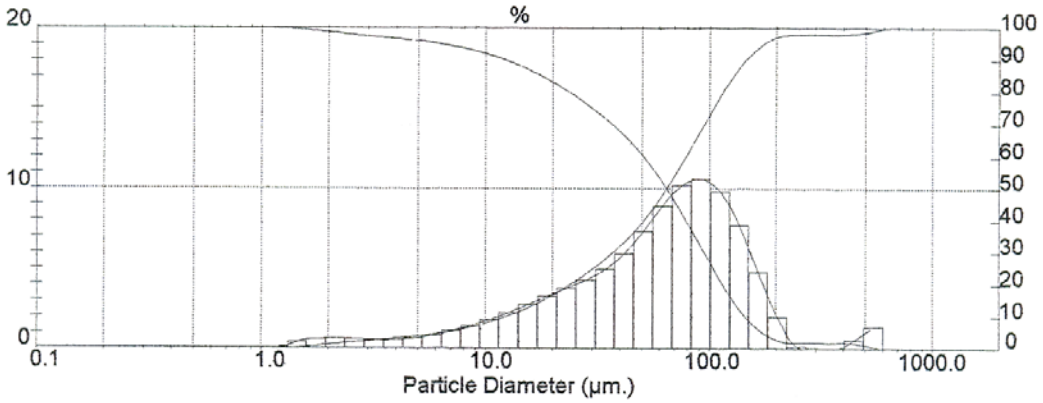
Concentration = 0.181 %
d (0.1) = 12.41 µm
Span = 2.06

Obscuration = 44.71 %
d (0.9) = 145.47 µm

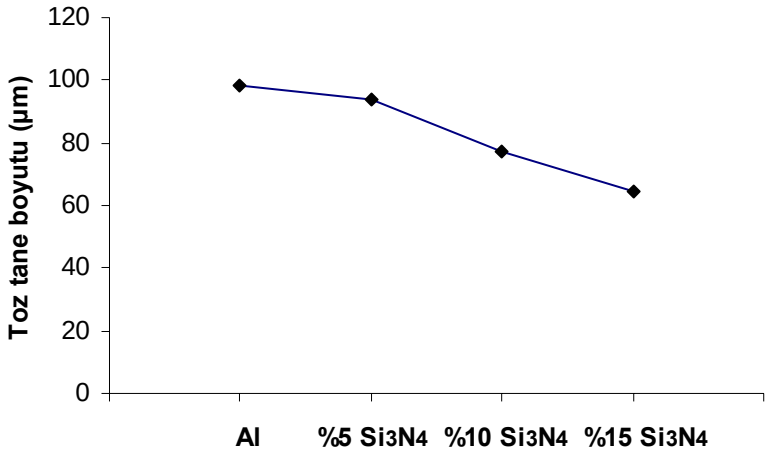
Mode = 90.02 µm
Density = 1.00 gm. / c.c.

Size (Lo) µm	Result In %	Size (Hi) µm	Result Below %
0.50	0.14	1.32	0.14
1.32	0.41	1.60	0.54
1.60	0.59	1.95	1.13
1.95	0.64	2.38	1.77
2.38	0.60	2.90	2.37
2.90	0.55	3.53	2.91
3.53	0.54	4.30	3.46
4.30	0.64	5.24	4.10
5.24	0.84	6.39	4.93
6.39	1.11	7.78	6.05
7.78	1.42	9.48	7.46
9.48	1.79	11.55	9.25
11.55	2.24	14.08	11.49
14.08	2.75	17.15	14.24
17.15	3.29	20.90	17.53
20.90	3.78	25.46	21.31

Size (Lo) µm	Result In %	Size (Hi) µm	Result Below %
25.46	4.29	31.01	25.60
31.01	4.94	37.79	30.54
37.79	5.95	46.03	36.49
46.03	7.35	56.09	43.85
56.09	8.94	68.33	52.79
68.33	10.20	83.26	62.99
83.26	10.61	101.44	73.60
101.44	9.83	123.59	83.43
123.59	7.71	150.57	91.15
150.57	4.79	183.44	95.94
183.44	1.99	223.51	97.92
223.51	0.18	272.31	98.10
272.31	0.00	331.77	98.10
331.77	0.01	404.21	98.11
404.21	0.55	492.47	98.66
492.47	1.34	600.00	100.00



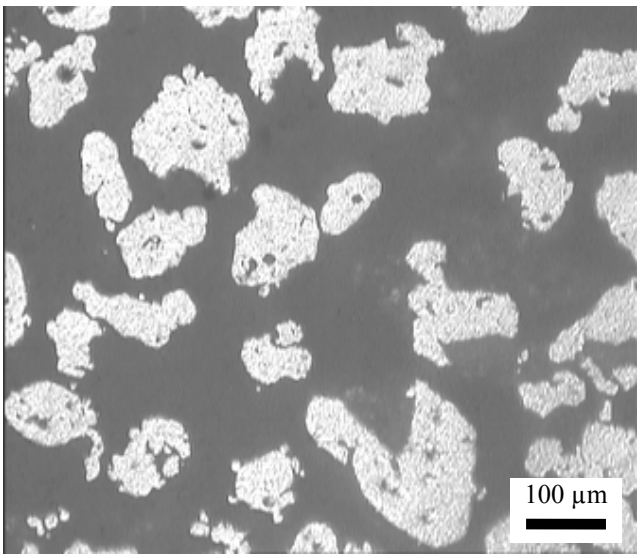
Şekil 8.4. % 15 Si_3N_4 içeren kompozit tozunun toz tane boyut dağılımı.



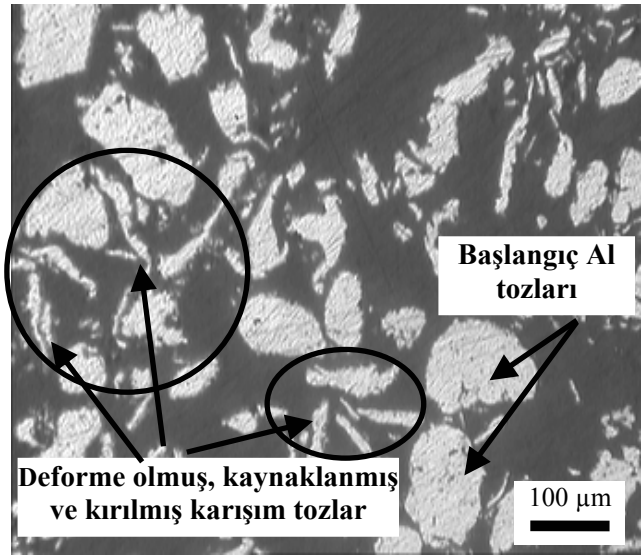
Şekil 8.5. Al ve karışım tozların toz tane boyutu ortalama değerleri.

8.1.2. Al ve mekanik karıştırma sonrası karışım tozların biçimi

Mekanik karıştırma yapılmayan Al tozların mikro fotoğraflarında, tozların geometrisinin küresele yakın fakat grift yüzeye sahip olduğu görülmektedir (Resim 8.1). % 5 Si_3N_4 içeren karışım tozların tane boyutunda bir miktar küçülme ve başlangıç morfolojisindeki küresellikten plaka biçimine değişim görülmektedir. Buradan, mekanik karıştırma sırasında bir miktar tozun kırılma sürecinde olduğu görülmektedir. Tozların morfolojisinin düzensizliği ve deforme olup kırılmış parçacıkların birbiri ile kaynak oldukları Resim 8.2' de görülmektedir.

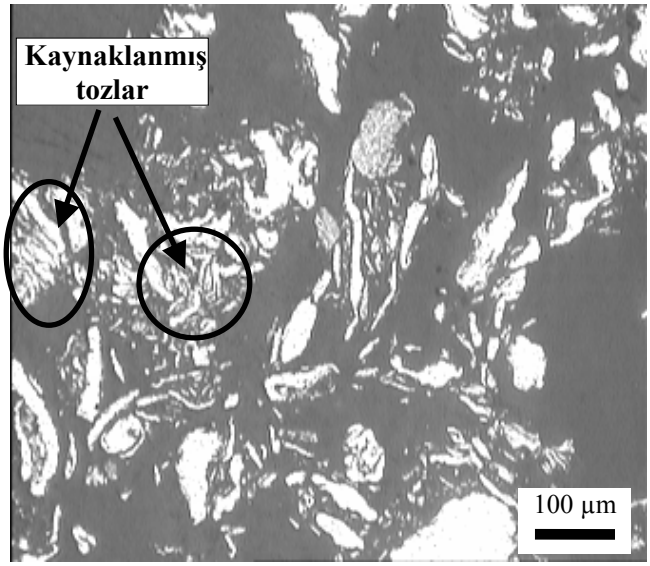


Resim 8.1. Al tozların morfolojisi.

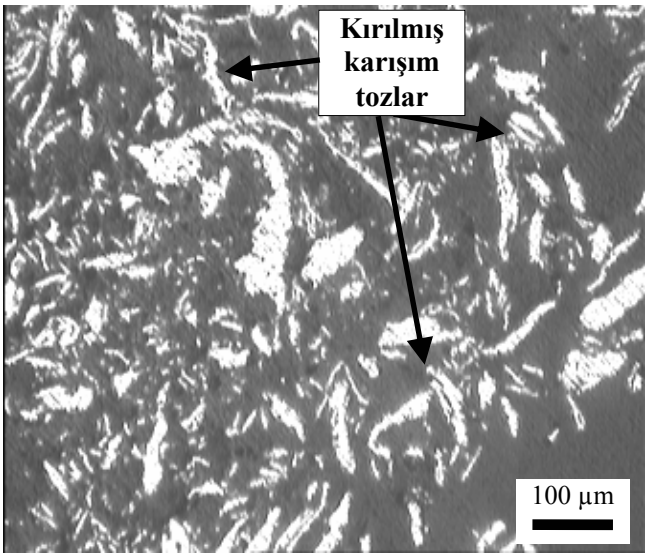


Resim 8.2. %5 Si_3N_4 içeren mekanik karıştırma yapılmış tozların morfolojisi.

% 10 Si_3N_4 içeren kompozit toz partiküllerin mekanik karıştırma sonrası şekli tamamen değişmiş ve plakalı küçük parçacıklar haline gelmiştir (Resim 8.3). Bazı toz partikülleri ise halen birbirleri ile kaynaklı durumda görünmektedir (Resim 8.3' de daire içinde gösterilmiştir). % 15 Si_3N_4 içeren karışım tozun morfolojisi diğer karışım tozlardan daha fazla değişmiştir (Resim 8.4). Takviye oranının artması, karışım toz parçacıklarının küçük ve karmaşık şekilli olmasını sağlamıştır. Bu Si_3N_4 oranında, 1 saat' lik mekanik karıştırma sonunda, kaynaklanma ve kırılma mekanizmasının yoğun olarak meydana geldiği söylenebilir.



Resim 8.3. %10 Si_3N_4 mekanik karıştırma yapılmış tozların morfolojisi.



Resim 8.4. %15 Si_3N_4 mekanik karıştırma yapılmış tozların morfolojisi.

8.1.3. Al ve MMK malzemelerin yoğunlukları

Al ve karışım tozların presleme işleminde 800 MPa basınç uygulanmıştır. Çizelge 8.1' de ÇKM' lerinin preslendikten sonraki ham yoğunlukları ve 650 ^{o}C' de 2 saat sinterleme sonrası yoğunlukları verilmiştir.

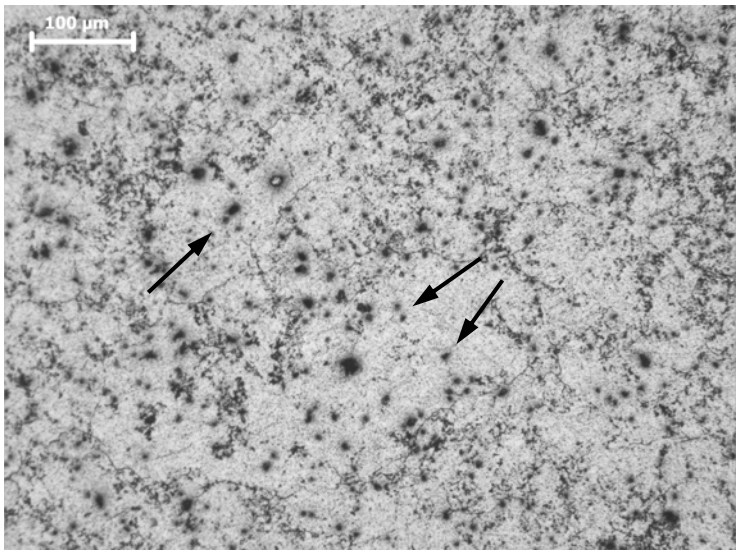
Çizelge 8.1. Presleme sonrası ham yoğunluk ve sinterleme sonrası yoğunluklar.

Malzeme	Ham yoğunluk (%)	Gerçek yoğunluk (g/cm^3)	Teorik yoğunluk (g/cm^3)	Teorik yoğunluk (%)
% 99,9 Al	95,1	2,638	2,70	97,7
% 5 Si_3N_4	93,8	2,596	2,725	95,3
%10 Si_3N_4	92,9	2,590	2,750	94,2
%15 Si_3N_4	90,8	2,553	2,775	92

En yüksek ham ve sinterleme sonrası yoğunluğa Al numunelerde rastlanmıştır. Bu numune için ulaşılan en büyük yoğunluk %97,7 dir. Kompozit numunelerde ise artan Si_3N_4 takviye miktarıyla gerçek yoğunlukta artış olmasına rağmen teorik yoğunlukta

azalma görülmektedir. Al' ye göre yoğunluğu yüksek olan Si_3N_4 partiküllerin kompozit içerisindeki oranının artmasıyla parça yoğunluğunun artması beklenirken, parça yoğunluğu azalmıştır. Bunun sebebi, tane boyutu 0,1-0,3 μm arasında olan Si_3N_4 miktarının artmasıyla, matris/takviye arayüzey alanının arttığı ve bununda gözenekliliği artırdığı düşünülmektedir. Si_3N_4 takviye miktarındaki artış ile MMK malzemelerin gerek ham gerekse sinterleme sonrası teorik yoğunluğu düştüğü belirlenmiştir. Kompozit numunelerde sinterleme sonrası minimum yoğunluk ise % 92 ile % 15 Si_3N_4' lü kompozit numunede ölçülmüştür.

Üretilen kompozit numunelerin Keller çözeltisiyle 20- 100 sn arasında değişen sürelerde dağlandıktan sonraki mikroyapı fotoğrafları Resim 8.5, Resim 8.6, Resim 8.7 ve Resim 8.8' de gösterilmiştir.

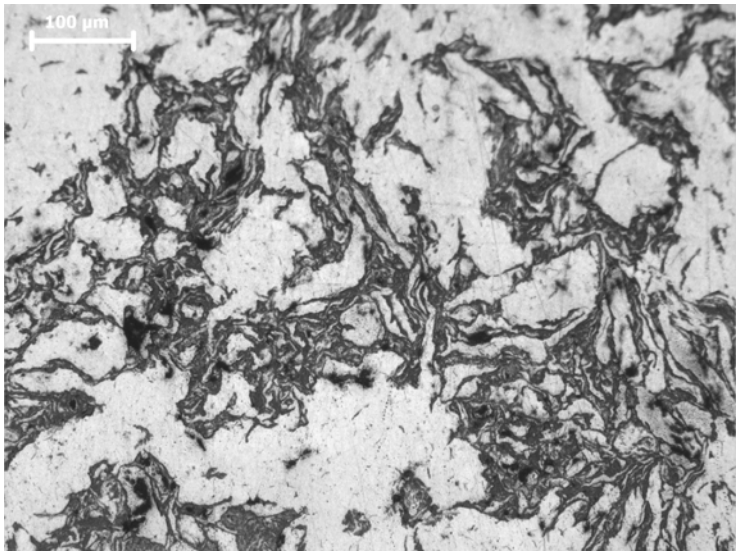


Resim 8.5. Al numunesinin mikroyapısı.

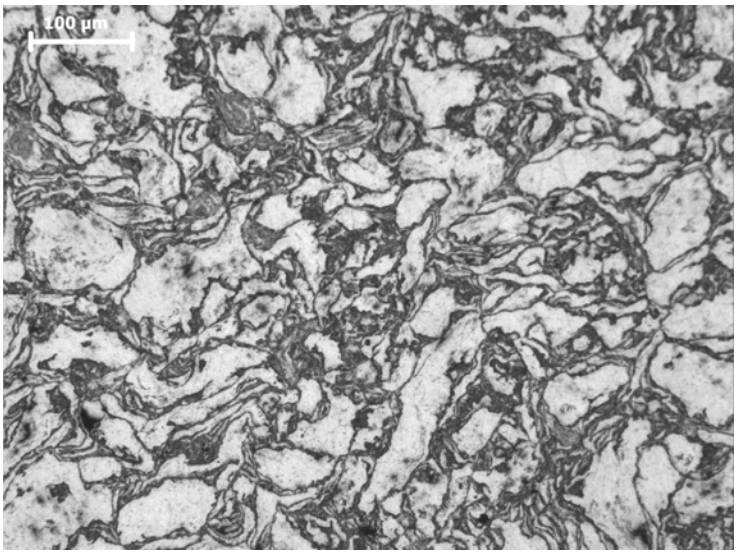
Al numunede Resim 8.5' te oklarla gösterilen gözeneklerin varlığına rağmen kompozit numunelere göre yoğunluğu çok daha yüksektir. Bu numunede sinterlemenin son derece iyi olduğu görülmekte ve dağlama sonucu oluşan tane sınırlarının görünümü, dövme Al malzemelerin özelliklerini yansıtmaktadır.

Resim 8.6' da gösterilen % 5 seramik takviye katkılı numunenin mikroyapısından ise, dağlamanın etkisiyle özellikle tane sınırlarında yoğun çukurlaşma etkileri

görülmektedir. Bu etkiler Keller çözeltisinin tane sınırındaki aşındırma etkisiyle birlikte, özellikle tane sınırları boyunca var olan gözeneklerin dağlamadan etkilendiği düşünülmektedir. ~ 0,1 μm gibi çok küçük boyutundaki Si_3N_4 partikül/matris ara yüzeylerinde gözenek beklentisi zayıf ihtimaldir. Ancak, muhtemel sinterleşme problemleri sebebiyle gözeneklerin tane sınırlarında yoğunlaştığı düşünülebilir.

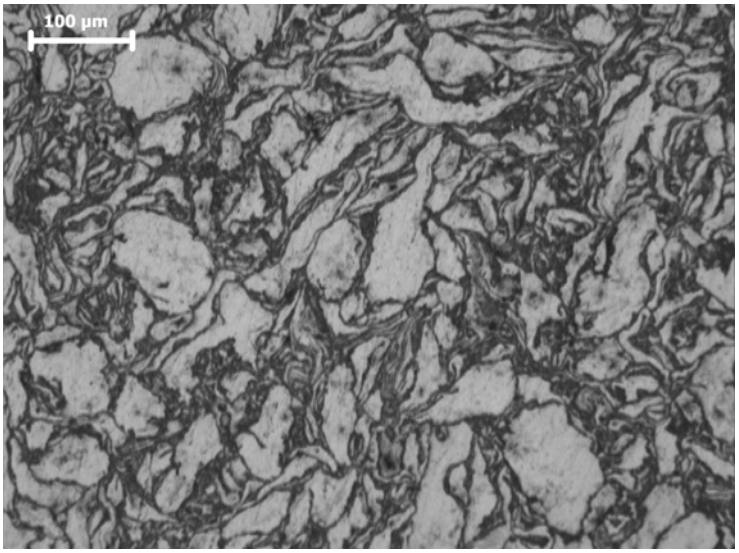


Resim 8.6. Al- % 5 Si_3N_4 kompozit malzemesinin mikroyapısı.



Resim 8.7. Al- % 10 Si_3N_4 kompozit malzemesinin mikroyapısı.

% 15 seramik takviye içeren numunede bu etki daha fazla görülmekte (Resim 8.8) ve mikroyapı aşırı dağlanmış gibi görünmektedir. Bu durum, % 15' lik numunenin gözenek oranının daha fazla olduğunu göstermektedir.



Resim 8.8. Al- % 15 Si_3N_4 kompozit malzemesinin mikroyapısı.

8.1.4. MMK malzemelerin mekanik özellikleri (sertlik ve çapraz kırılma mukavemeti)

Çizelge 8.2' de 650 ^oC' de 120 dak. süreyle sinterlenmiş numunelerin mekanik özellikleri verilmiştir. Si_3N_4 takviye miktarı artıkça sertlik artmaktadır. Ancak sertlikteki bu artışa rağmen çapraz kırılma mukavemeti azalmaktadır. Bu durumun, %15 Si_3N_4 takviye içeren kompozit malzemenin yoğunluğunun azalmasına da sebep olan gözenek yoğunluğundaki artıştan ve sinterleme problemlerinden kaynaklandığı düşünülmüştür.

Çizelge 8.2. MMK malzemelerin çapraz kırılma mukavemetleri ve sertlik değerleri.

Numune	Çapraz Kırılma Mukavemeti (MPa)	Sinterlenmiş sertlik (VH5)
Alüminyum (% 99,9 Saf)	174	23
%5 Si_3N_4 (karışım)	102	41
%10 Si_3N_4 (karışım)	117	60
%15 Si_3N_4 (karışım)	77	69

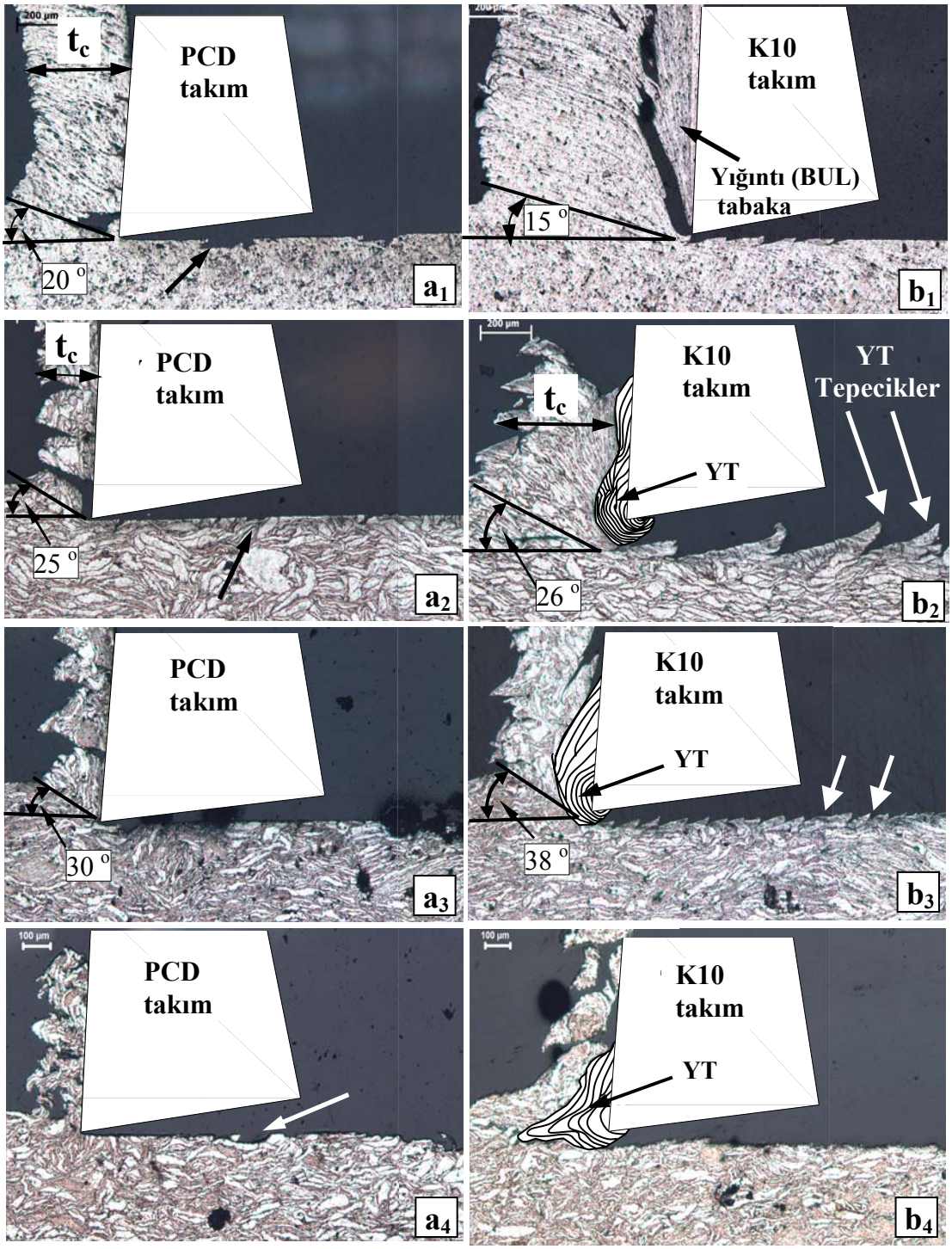
Bununla birlikte, % 10 seramik takviye içeren numunenin yoğunluğunun, % 5 takviye içeren numuneden daha az ve gözenek yoğunluğunun daha fazla olmasına rağmen, en yüksek ÇKM' ne sahip numune 117 MPa ile % 10 Si_3N_4 içeren numunedir. Bu durum, kompozit malzemeler içinde % 10 karışım oranıyla en iyi sinterleşmenin % 10 Si_3N_4 seramik takviye içeren numunede olduğunu göstermektedir. Benzer sonuç ve ilişki, Akoral' ın (2003) ve Özkök' ün (2004) yaptıkları çalışmalarda Al matris içerisine % 10 seramik takviye ile üretilmiş kompozit malzemede en iyi sinterleşme ve ÇKM' nin olduğu belirlenmiştir [3, 14].

8.2. İşlenebilirlik Özellikleri

8.2.1. Al ve kompozit malzemelerde talaş oluşumu

Resim 8.9' de Al ve MMK numunelerin K10 ve PCD kesici takımla 50 m/dak kesme hızında işlenmesi sırasında oluşan talaş köklerinin mikroyapı fotoğrafları görülmektedir. K10 takımla tornalanmış Al numunenin işlenmiş yüzeyinde dışbükey yığıntı talaş (YT) kalıntıları gözlenmiştir (Resim 8.9.b). Talaş kısmında ise YT yerine yığıntı tabaka (BUL) oluşumu belirlenmiştir (Resim 8.9.b_1). MMK numunelerin K10 takımla işlenmesinde ise büyük boyutlarda YT tepecikleri belirlenmiştir (Resim 8.9.b_2, Resim 8.9.b_3 ve Resim 8.9.b_4' de gösterilmiştir). En büyük YT % 5 Si_3N_4 takviyeli kompozit numunenin işlenmesinde görülmüştür. Yaklaşık 100 μm yüksekliğinde olan bu YT kalıntıları, takım/talaş ara yüzeyinde

oluşmuş YT' nin takımın esas kesici kenarının altına doğru büyümesiyle oluşmuştur. Artan Si_3N_4 oranı ve buna bağlı artan sertlikle birlikte K10 takımla işlenen yüzeyde oluşan YT tepecik boyutlarının azaldığı belirlenmiştir (Resim 8.9.b_2, Resim 8.9.b_3 ve Resim 8.9.b_4). PCD takımla işlenen yüzeylerde YT kalıntıları ve yığıntı tabaka' ya rastlanmamıştır. PCD takımla işlenmiş yüzeyler son derece düzdür. Ancak, tüm numunelerin işlenmiş yüzeylerinde Resim 8.9.a_1, Resim 8.9.a_3 ve Resim 8.9.a_4' de oklarla gösterilen küçük içbükey hatalar gözlenmiştir.

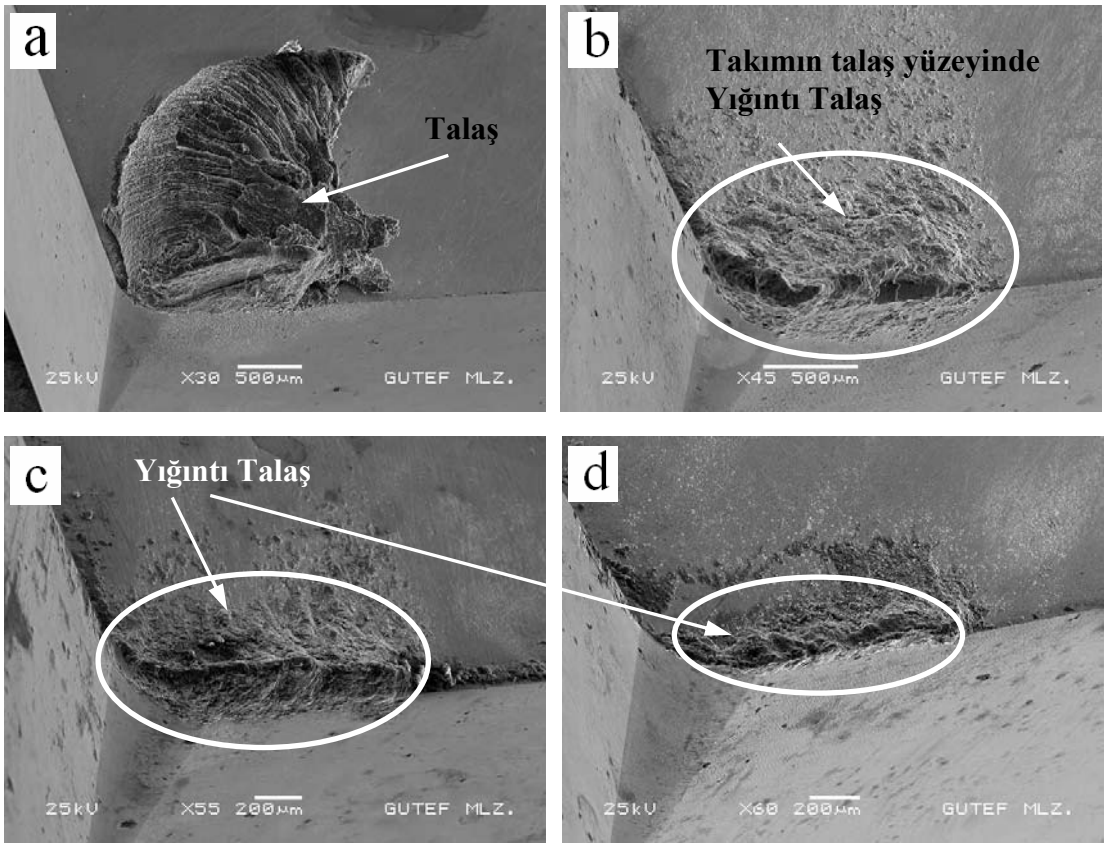


Resim 8.9. 50 m/dak kesme hızında işleme sırasındaki talaş oluşumu. PCD takımla işlenmiş numuneler (**a**) , $\mathbf{a_1}$= Al, $\mathbf{a_2}$= %5 Si_3N_4, $\mathbf{a_3}$= %10 Si_3N_4, $\mathbf{a_4}$= %15 Si_3N_4. K10 takımla işlenmiş numuneler (**b**), $\mathbf{b_1}$= Al, $\mathbf{b_2}$= %5 Si_3N_4, $\mathbf{b_3}$= %10 Si_3N_4, $\mathbf{b_4}$= %15 Si_3N_4.

Resim 8.10' da MMK numunelerin 50 m/dak kesme hızında tornalamasında

kullanılan K10 kesici ucun SEM fotoğrafları verilmiştir. Yapışma etkisi MMK numunelerdeki seramik takviye miktarının artmasıyla azalmıştır. % 5 Si_3N_4 içeren numunede hem kesici uç yan yüzeyinde hemde kesici uç talaş yüzeyinde önemli miktarda yapışma gözlenmiştir (Resim 8.10.b).

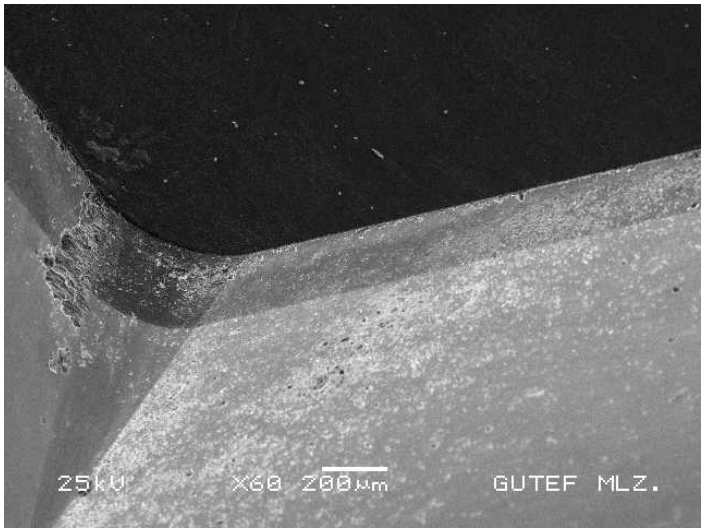
% 10 ve % 15 oranlı numunelerde kesici uç yan yüzeyinde bu yapışma etkisi çok azalmıştır (Resim 8.10.c ve Resim 8.10.d). Al numunenin işlenmesinde ise kesici uç yan yüzeyinde yapışma gözlenmez iken takımın talaş yüzeyinde yapışmış talaş görülmüştür (Resim 8.10.a).



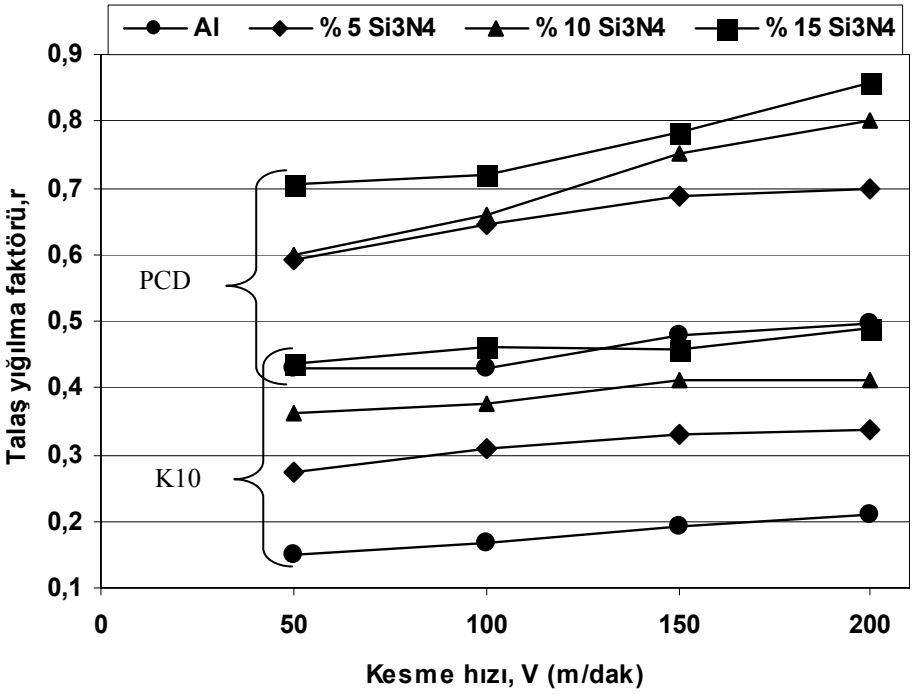
Resim 8.10. MMK' ların 50 m/dak' da tornalanmasında kullanılan K10 kesicilerin SEM görüntüleri. a) Al, b) Al- % 5 Si_3N_4, c) Al- % 10 Si_3N_4, d) Al- % 15 Si_3N_4.

PCD kesici uç ile yapılan tornalama işlemlerinde takım üzerinde belirgin bir yapışma etkisine rastlanmamıştır. K10 kesicide en fazla yapışma etkisi gösteren % 5 Si_3N_4 içeren kompozit malzemenin PCD takımla işlenmesinde dahi belirgin yapışma

mevcut değildir (Resim 8.11).



Resim 8.11. MMK' ların 50 m/dak' da tornalanmasında kullanılan PCD kesicinin SEM görüntüsü.



Şekil 8.6. Kesme hızına ve takım malzemesine bağlı talaş yığılma faktöründeki değişim.

Şekil 8.6' da Al ve MMK malzemelerin kesme hızına bağlı talaş yığılma faktörleri (r) gösterilmiştir. PCD takımla işlemede oluşan yığılma faktörü, K10 takımla

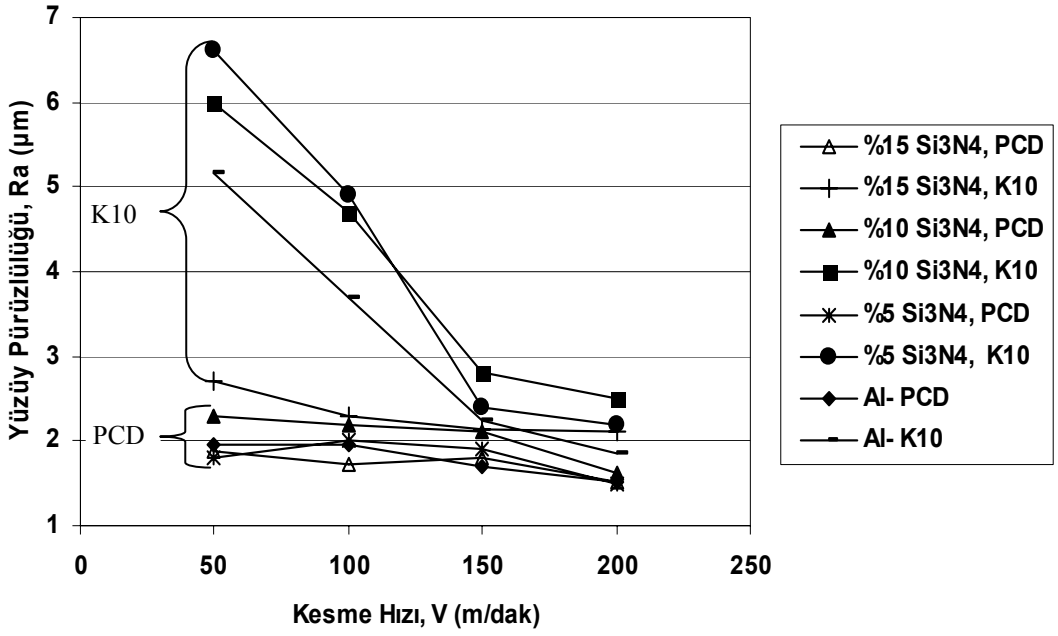
işlemede oluşan yığılma faktöründen daha büyüktür. Bu durum, PCD takımla işleme sırasında oluşan deforme olmuş talaş kalınlığının (t_c), K10 takımla işlemede oluşan t_c' den küçük olduğunu ve takımın talaş yüzeyinde yığılan talaşın PCD takımda çok daha az olduğunu göstermektedir (Resim 8.9.a_1, Resim 8.9.a_2, Resim 8.9.b_1 ve Resim 8.9.b_2). Bunun muhtemel nedeni ise K10 takımlarda meydana gelen yüksek sürtünme katsayısıdır. Yığılma faktörü, çıkan talaş kalınlığıyla (t_c) ters orantılı olduğundan, yığılma faktörü değeri PCD takımla işleme sonucunda çıkan talaşlarda daha fazladır. MMK numunelerde Si_3N_4 takviye miktarının da t_c' nin kalınlığını değiştirdiği gözlenmiştir. Si_3N_4 miktarı artıkça yığılma faktörü de artmıştır. Aynı zamanda kesme hızı artıkça yığılma faktöründe de artma eğilimi mevcuttur. Artan kesme hızıyla yükselen takım/talaş arayüzey sıcaklığı aynı zamanda bu bölgede oluşan sürtünme kuvvetlerini düşürdüğünden yüksek hızlarda yığılma faktöründe artış belirlenmiştir.

Al ve MMK numunelerin işlenmesinde oluşan kesme düzlemi açısı (Ø) kesici takım malzemesine göre farklılık göstermiştir. Al numunesinin K10 takım ile işlenmesinde kesme düzlemi açısı $Ø_{K10} \cong 15°$, PCD takım ile işlenmesinde ise $Ø_{PCD} \cong 20°$ olduğu belirlenmiştir (Resim 8.9.a_1 ve b_1). Aynı zamanda, MMK numunelerin işlenmesinde de K10 takımda oluşan Ø, PCD takıma göre küçük çıkmıştır. Takım malzemesindeki farklılıkla birlikte, artan Si_3N_4 miktarıyla da her iki takımda kesme düzlemi açısının artığı gözlenmiştir. Resim 8.9.a_2 ve Resim 8.9.b_2' de K10 takım için $Ø_{K10} \cong 25°$, PCD takım için ise $Ø_{PCD} \cong 26°$ iken, Resim 8.9.a_3 ve Resim 8.9.b_3' da $Ø_{K10} \cong 30°$, $Ø_{PCD} \cong 38°$ ölçülmüştür. Artan kesme düzlemi açısıyla, deforme olmuş talaş kalınlığının, takımın talaş yüzeyine etkiyen talaş kaldırma kuvvetinin ve takım/talaş temas alanının azaldığı söylenebilir.

8.2.2. Yüzey pürüzlülüğü

Düşük kesme hızlarında yüzey pürüzlülüğü K10 kesici uç ile işlenmiş MMK malzemelerde yüksektir (Şekil 8.7). Ancak artan kesme hızıyla Ra değerleri büyük oranda azalmış ve 150 m/dak kesme hızından sonraki hızlarda azalma oranı düşmüştür. Al, % 5 Si_3N_4 ve % 10 Si_3N_4 malzemelerde oluşan Ra pürüzlülük

değerlerinin düşük hızlarda yüksek olmasının sebebi, büyük boyutlarda oluşan yığıntı talaş ile ilgilidir (Resim 8.9.b1, Resim 8.9.b2 ve Resim 8.9.b3). Resim 8.9.b_2'de düşük kesme hızlarında K10 takımla işlenen % 5 Si_3N_4 içeren numunede büyük boyutlarda oluşan YT' nin esas kesici kenarın altına doğru büyüdüğü görülmektedir. Zira kesme hızındaki artışla birlikte, işlenmiş yüzeydeki yüzey kalitesinin iyileştiği belirlenmiştir. Diğer araştırmacılar tarafından da Al matrisli kompozit malzemelerin işlemesi sırasında kesme hızındaki artışın YT boyutlarını küçülttüğü belirtilmiştir [4, 69, 74, 76].

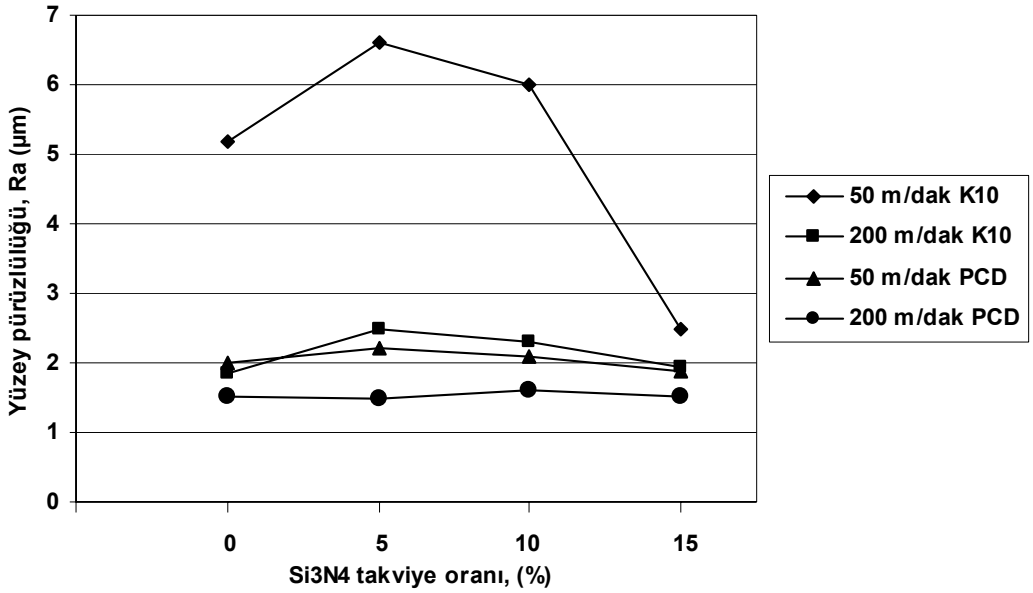


Şekil 8.7. Kesme hızı ve takım malzemesinin yüzey pürüzlülüğüne etkisi.

Ani durdurma aparatının kullanımı sırasında, K10 kesici takım kesme konumundan ayrılırken YT' nin bir kısmı takımın talaş yüzeyinde kalmıştır. Takımın talaş yüzeyine yapışan bu talaş yüzey pürüzlülüğü kalitesini etkilememektedir (Resim 8.10). Esas yüzey pürüzlülüğü kalitesini etkileyen yapışma, esas kesici kenarın altına yığılan talaştır (Resim 8.10.b, Resim 8.10.c ve Resim 8.10.d). Farklı malzeme ile çalışan araştırmacının yaptığı bir çalışmada bulunan bulgularda da aynı ilişki belirlenmiştir [77].

Al ile % 5 Si_3N_4 numunelerin yüzey pürüzlülüğü arasındaki fark, Al malzemelerin

K10 kesici ile işlenmesinde takımın yüzeyine yapışan yığıntı tabakadan kaynaklanmaktadır (Resim 8.9.b1). Bu olay aşırı sünek ve saf malzemelerin işlenmesinde YT yerine yığıntı tabaka oluşma eğilimlerinden kaynaklanır [77]. Al' nin yüzey pürüzlülüğü, % 5 ve % 10 takviye içeren MMK malzemelerin yüzey pürüzlülüğünden daha düşük ölçülmüştür (Şekil 8.8).



Şekil 8.8. Farklı kesme hızlarında kesici takım malzemesi ve Si_3N_4 miktarının yüzey pürüzlülüğüne etkisi.

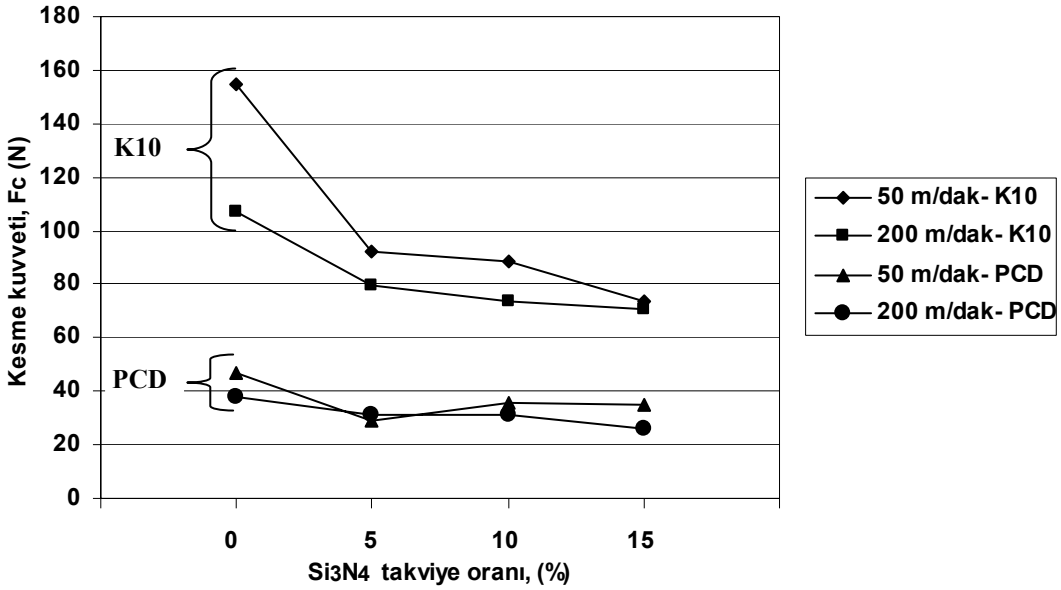
50 m/dak kesme hızında K10 takımla işlenen numunelerde takviye miktarı artıkça yüzey pürüzlülüğü azaltılmıştır. Şekil 8.8' de 50 m/dak kesme hızında K10 takımla işlenen Al numunesinin işlenmiş yüzeyindeki yığıntı talaş boyutları küçük iken % 5 Si_3N_4 içeren numunenin işlenmiş yüzeyinde çok büyük boyutlarda yığıntı talaş gözlenmiştir. Burada, % 5 takviye ilavesinin yüzey pürüzlülüğünü arttırdığı söylenebilir. Bu durumun aksine, % 10 Si_3N_4 içeren numunenin işlenmiş yüzeyindeki YT boyutu küçülmüş ve yüzey pürüzlülüğü azalmıştır. Çok küçük boyutta yığıntı talaş oluşan % 15 Si_3N_4 içeren numunede ise çok küçük değerlerde yüzey pürüzlülüğü belirlenmiştir.

Al ve MMC kompozitlerin PCD takımla işlenmesinde oluşan yüzey pürüzlülüğünde belirgin bir değişkenlik yoktur. PCD takımla işlemede, artan kesme hızıyla birlikte

Ra değerinde çok az da olsa düşüş görülmektedir. 50–200 m/dak kesme hızı arasında tornalamayla değişen yüzey pürüzlülük farkı Ra≈0,5 µm' dur. MMK malzemelerin PCD takım ile işlenmiş yüzeylerinde YT oluşumuna ait bir kalıntı görülmemektedir (Resim 8.9.a_2, Resim 8.9.a_3 ve Resim 8.9.a_4).

8.2.3. Tornalama kuvvetleri

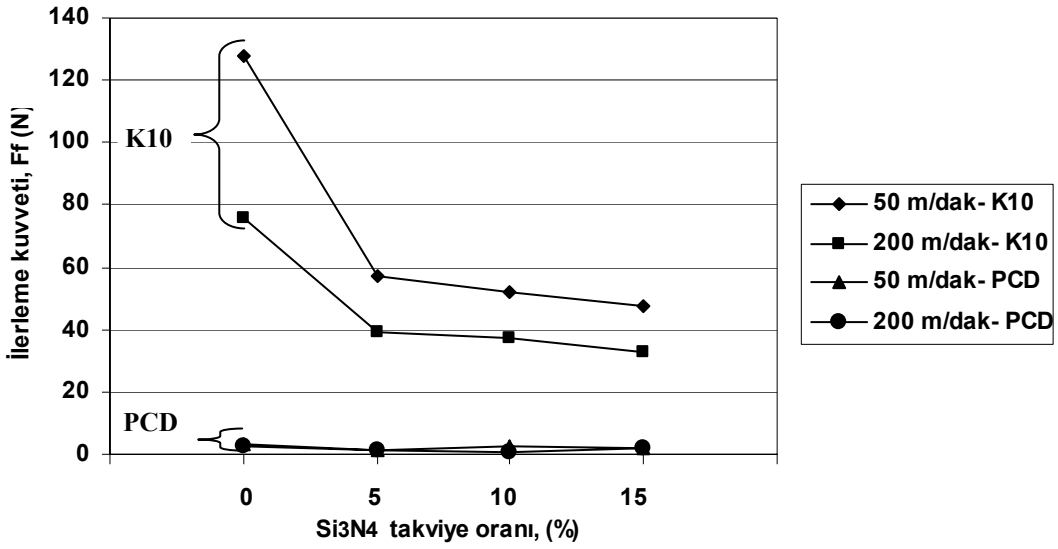
Tornalama kuvvetlerinin Si_3N_4 miktarının artmasıyla K10 takımda düştüğü gözlenmiştir (Şekil 8.9 ve Şekil 8.10). K10 takımla işlemde oluşan tornalama kuvvetleri, PCD' de oluşan kuvvetlerden daha büyüktür. Her iki takım için de Al numunelerin işlenmesinde oluşan tornalama kuvvetleri MMK numunelerden daha yüksektir. Bununla birlikte bütün numunelerin PCD takımla işlenmesinde en düşük tornalama kuvvetleri elde edilmiştir.



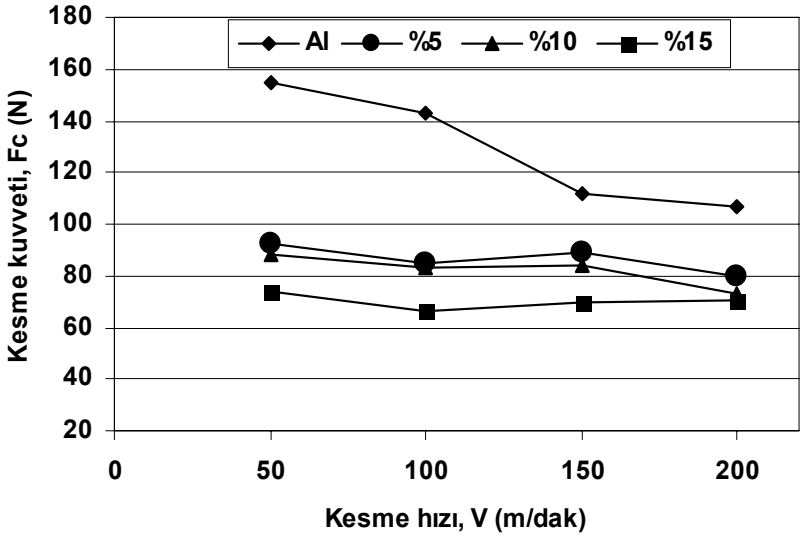
Şekil 8.9. Farklı kesme hızlarında kesici takım malzemesi ve Si_3N_4 miktarının kesme kuvvetine etkisi.

K10 kesici uçta oluşan kesme kuvveti, artan kompozit sertliği ve azalan çapraz kırılma mukavemeti ile azalma göstermiştir. Al numunenin K10 takımla işlenmesinde artan kesme hızıyla oluşan kesme kuvveti arasındaki fark yaklaşık 50 N olarak belirlenmiştir. %15 Si_3N_4 içeren numunenin K10 takımla işlenmesinde ise kesme hızından bağımsız olarak, oluşan kesme kuvvetindeki fark ihmal edilecek

kadar azdır (Şekil 8.9). Si_3N_4 oranının artması ile kesme düzlemi boyunca mevcut gözenek ve partikül çevresinde gerilim yoğunluğunu artırması ve bu düzlem boyunca çatlak oluşumu ve kırılmayı kolaylaştıracağından tornalama kuvvetlerinde düşüş gözlenmiştir [70, 76, 78].



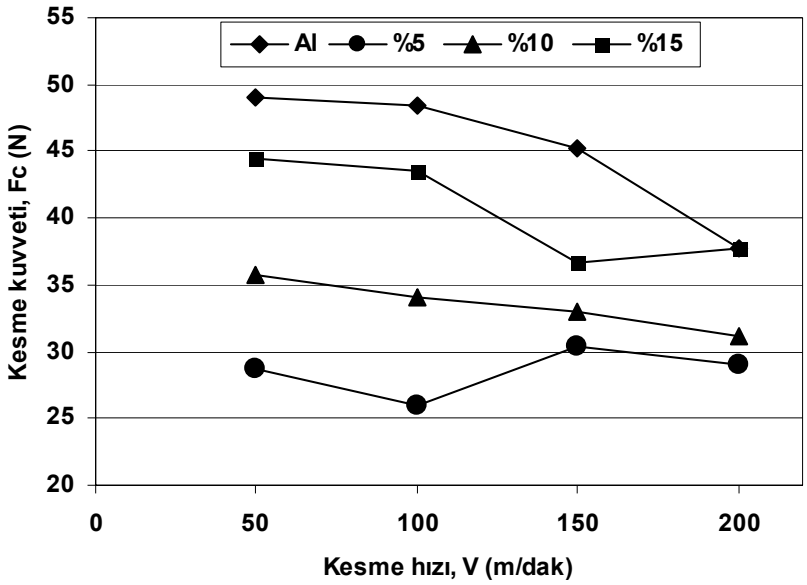
Şekil 8.10. Farklı kesme hızlarında kesici takım malzemesi ve Si_3N_4 miktarının ilerleme kuvvetine etkisi.



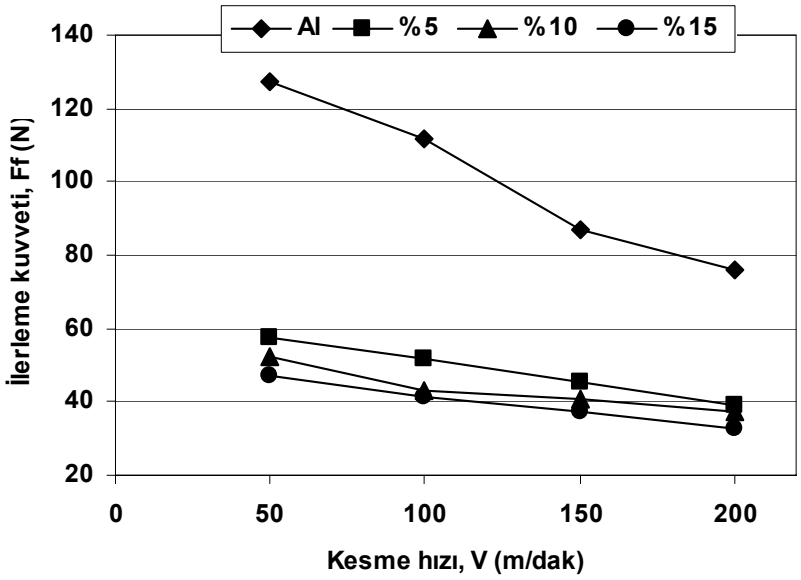
Şekil 8.11. Si_3N_4 miktarı ve kesme hızının K10 takımla işlemede oluşan kesme kuvvetine etkisi.

MMK malzemelerin K10 kesiciyle işlenmesinde oluşan kararlı YT kesici kenar gibi davranıp, kesme düzlemi açısını artırdığından kesme kuvvetinde düşüş gözlenmiştir

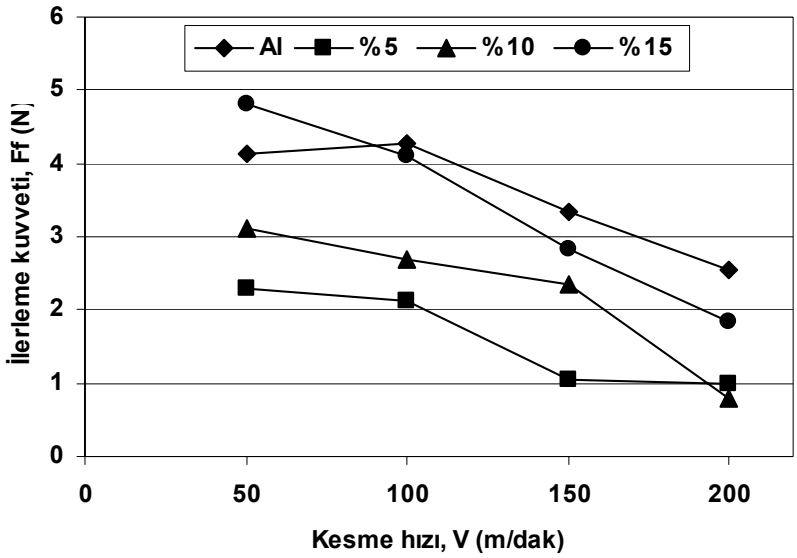
(Şekil 8.9 ve Resim 8.10.b_3).



Şekil 8.12. Si_3N_4 miktarı ve kesme hızının PCD takımla işlemede oluşan kesme kuvvetine etkisi.



Şekil 8.13. Si_3N_4 miktarı ve kesme hızının K10 takımla işlemede ilerleme kuvvetine etkisi.



Şekil 8.14. Si_3N_4 miktarı ve kesme hızının PCD takımla işlemede ilerleme kuvvetine etkisi.

MMK malzemelerin PCD takımla tornalanmasında oluşan kesme ve ilerleme kuvvetlerinde kesme hızına ve takviye oranına bağlı belirgin bir değişkenlik belirlenmemiştir (Şekil 8.12 ve Şekil 8.14). Ancak, MMK malzemelerin işlenmesinde oluşan tornalama kuvvetleri alüminyum malzemelerin işlenmesinde oluşan kuvvetlerden çok daha küçüktür.

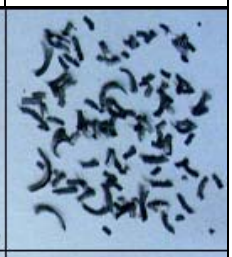
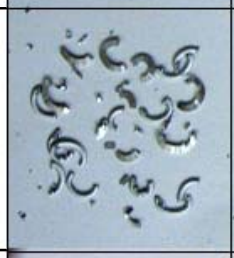
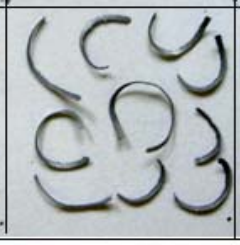
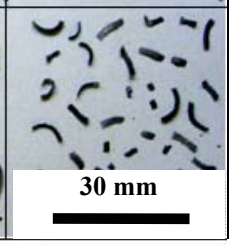
Özellikle K10 takımla işlemede oluşan tornalama kuvvetleri artan kesme hızıyla birlikte önemli miktarda azalmıştır (Şekil 8.11, Şekil 8.12, Şekil 8.13 ve Şekil 8.14). Bu durum, kesme hızıyla birlikte artan talaş kaldırma sıcaklığı sebebiyle Al ve MMK malzemelerde oluşan ısıl yumuşamaya bağlanabilir [79, 80]. Bu olay özellikle K10 takımla işlenmiş Al numunede daha belirgindir (Şekil 8.11). Zira, K10 takımın sürtünme katsayısının PCD takımdan daha fazla olması [80] talaş kaldırma sıcaklıklarının artmasına sebep olur. Bu sayede, K10 takımla Al malzemenin işlenmesinde oluşan talaş kaldırma sıcaklıklarının, kesme kuvvetlerini düşürme etkisi daha belirgin olmuştur.

PCD takımlarla tornalamada oluşan tornalama kuvvetleri çok düşüktür (Şekil 8.11, Şekil 8.12, Şekil 8.13 ve Şekil 8.14). Al ve % 15 Si_3N_4 içeren numunelerin 50 m/dak' da K10 takımla işlenmesinde oluşan kesme kuvveti arasındaki fark yaklaşık

80 N iken, PCD takımla işlenmesinde oluşan kesme kuvvetleri arasındaki fark yaklaşık 20 N olarak belirlenmiştir. Bu durum, PCD takımın sürtünme katsayısı K10 takıma göre çok daha düşük olmasına bağlanabilir. Özellikle ilerleme kuvvetinin 2,5 N aralığında ihmal edilecek kadar az olduğu belirlenmiştir (Şekil 8.14).

8.2.4. Talaş biçimleri

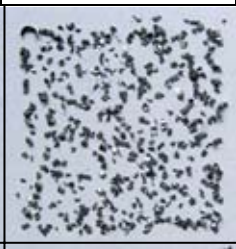
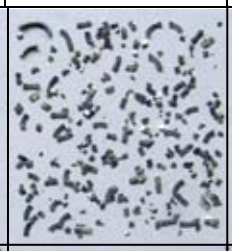
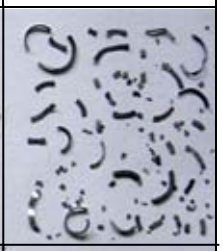
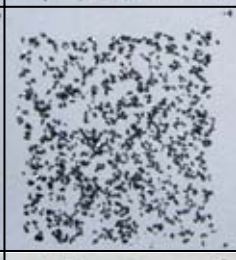
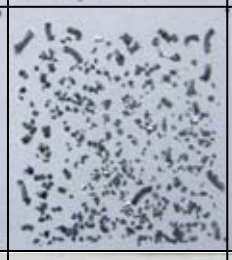
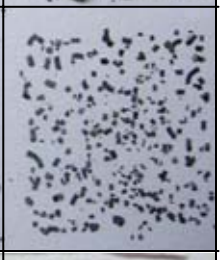
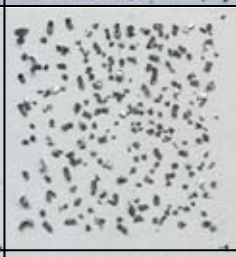
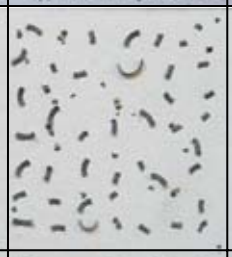
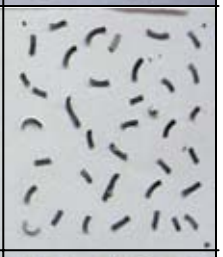
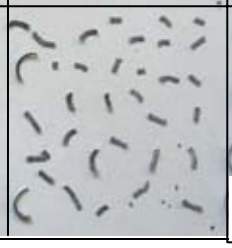
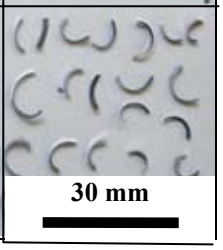
Resim 8.12' de, farklı kesme hızlarında K10 kesici takımla işlenmiş MMK malzemelerde oluşan talaş biçimleri verilmiştir.

Kesme hızı	K10 kesici takımla kesilen kompozit malzeme			
	% 0 Si_3N_4	% 5 Si_3N_4	% 10 Si_3N_4	% 15 Si_3N_4
50 m/dak				
100 m/dak				
150 m/dak				
200 m/dak				

Resim 8.12. K10 takım ile işlenmiş MMK malzemelerin talaş biçimleri.

Al ve MMK malzemelerin işlenmesinde genellikle kavisli (kapak) ve kırık talaşlar elde edilmiştir. Al malzemesinin işlenmesiyle küçük boyutlarda kapak talaşlar oluşmuştur. Kesme hızının artmasıyla belirgin bir değişiklik gözlenmemiştir. % 5, % 10 ve % 15 seramik takviye içeren MMK malzemelerin işlenmesinde ise düşük kesme hızlarında kapak şeklindeki talaşlar elde edilirken, kesme hızının artmasıyla nispeten kavisli kısa şerit talaşlar elde edilmiştir. Kesme hızı talaş boyutunu arttırmış ve Si_3N_4 takviye miktarının artmasıyla da talaş boyunun uzaması sınırlandırılmıştır. Seramik partiküllerinin varlığı sebebiyle kesme düzlemi boyunca plastik deformasyon sebepli gerilim konsantrasyonu oluşturacağından, talaş oluşumu sırasında meydana gelen segmentler arasındaki kayma anında kırılma oluşumu kolaylaşır. Bu durum, yüksek kesme hızlarında bile kırık ve kavisli talaş oluşumunu sağlayabilir [76]. Resim 8.12' da % 10 takviye içeren malzemenin, 150 m/dak işlenmesiyle oluşan kavisli kısa şerit şeklindeki talaşlar elde edilirken, 200 m/dak işlemede ise takviye miktarının artmasıyla küçük kavisli talaşlar elde edilmiştir. Bu talaş biçimleri, sert veya alaşım malzemelerin (pirinç vb.) işlenmesinde oluşan talaş tiplerine benzememektedir.

Resim 8.13' da farklı kesme hızlarında PCD kesici takımla işlenmiş MMK malzemelerin talaşları görülmektedir. PCD takımla Al ve MMK numunelerin işlenmesinde elde edilen talaş boyutları, K10 takımla işlemede elde edilen talaş boyutlarından daha küçüktür. PCD takımlarla işlemede, düşük hızlarda oluşan talaşın düzensiz ve helisel şekilde kıvrımlı olduğu görülmektedir. Yüksek hızlarda genel olarak talaş boyları artmıştır. Fakat 100 m/dak' da işlenmiş olan malzemelerde aksine bir durum söz konusudur.

Kesme hızı	PCD kesici takımla kesilen kompozit malzeme			
	% 0 Si_3N_4	% 5 Si_3N_4	% 10 Si_3N_4	% 15 Si_3N_4
50 m/dak				
100 m/dak				
150 m/dak				
200 m/dak				

Resim 8.13. PCD takım ile işlenmiş MMK malzemelerin talaş resimleri.

K10 takımlarla işleme sonucunda oluşan talaşların aksine Si_3N_4 miktarının artmasıyla, PCD takımlarda çıkan talaş boyu artmaktadır. Bunun sebebi, takım/talaş arayüzeyindeki sürtünme katsayısına bağlanır. Zira K10 malzemesine göre PCD takım malzemeleri, Al malzemelere karşı reaksiyona pasiftir. Bu sebeple PCD takımlarla işleme sırasında oluşan takım/talaş arayüzeyi sürtünme katsayısı K10 takımdan daha düşük olacaktır. Bu durum, kesme düzlemi açısının artmasına (dolayısıyla yığılma faktörünün artmasına) talaş kırılabilirliğinin azalmasına ve uzun talaşa sebep olabilir.

9. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Mekanik karıştırma sonrası seramik parçacıkların homojen dağılımı kısmen sağlanmıştır. Fakat mekanik karıştırma sonrası oluşan tozların boyutları ve geometrisi düzensizdir. Bu yüzden, yapılan çalışmada, üretilen farklı takviye oranlı MMC malzemelerin sinterleme sonrası mikroyapı fotoğraflarından ayırt edici belirgin bir özellik görülmemektedir. Üretilen kompozit parçalarda % 92- 97,7 arasında yoğunluğa ulaşılmıştır. En yüksek yoğunluk % 5 Si_3N_4 takviyeli kompozit malzemede elde edilmiştir.

En yüksek sertlik % 15 Si_3N_4 seramik takviyeli kompozit malzemede ölçülmüştür. Zira sertlik takviye miktarı artıkça artmakta, ancak çapraz kırılma dayanımı düşmektedir. Bu düşüş takviye miktarına bağlıdır, fakat en yüksek çapraz kırılma dayanımı % 10 Si_3N_4 seramik takviyeli MMC' de belirlenmiştir.

Üretilen MMC malzemelerin işlenmesinde, seramik takviye oranı yüzey pürüzlülüğünü etkilemiştir. Düşük hızlarda işlemede takviye oranı artıkça yüzey kalitesin artığı gözlenmiştir. Bununla birlikte, K10 kesici takımlara göre PCD kesici takımlarda çok daha düşük yüzey pürüzlülüğü elde edilmiştir. PCD takımla işlemede düşük yüzey pürüzlülüğü değerinin kesme hızından bağımsız olduğu görülmüştür. K10 takımla işlemelerde ise düşük hızlarda büyük boyutlarda oluşan YT yüzey kalitesini düşürmüştür. Artan hızla birlikte yüzey kalitesi artmıştır. Artan kesme hızıyla Ra değerleri büyük oranda azalmış ve 150 m/dak kesme hızından sonraki hızlarda azalma oranının düştüğü gözlenmiştir. Bununla birlikte, saf Al tozlarından preslenmiş ve sinterlenmiş Al toz metal numunenin K10 takımla işlenmesinde, MMC malzemelerde düşük hızlarda oluşan yığıntı talaş yerine yığıntı tabaka oluşumu gözlenmiştir.

MMC malzemelerin tornalanmasında, seramik takviye miktarı artıkça tornalama kuvvetleri azalmıştır. En büyük Fc ve Ff kuvveti % 5 Si_3N_4 takviyeli kompozit malzemenin 50 m/dak' da işlenmesinde görülmektedir. Bununla birlikte, düşük hızlarda PCD takımla işlemede oluşan tornalama kuvveti K10 takımla oluşan

tornalama kuvvetlerinden çok düşüktür ve oluşan kuvvetler kesme hızından bağımsızdır. K10 takımla işlemede oluşan Fc kuvveti büyüktür. Fakat artan kesme hızıyla birlikte düştüğü gözlenmiştir. PCD takımla işlenen MMC malzemelerde Ff kuvveti ihmal edilecek kadar küçüktür.

Literatürde, Al ve Al esaslı malzemelerin işlenmesinde genellikle kaplamasız K10 sert metal kesici uç malzemesi önerilmektedir. Ancak yapılan çalışmada, PCD takım kullanımının takım maliyeti dışında, işlenebilirlik özellikleri bakımında K10 kesiciden daha avantajlı olduğu görülmüştür. Bu sebeple, Al matrisli parçacık takviyeli MMK' ların özellikle bitirme tornalamalarında iyi yüzey kalitesi, düşük kesme kuvvetleri ve dar ölçü toleranslarının elde edilebilmesi için PCD takımların kullanımı önerilebilir.

KAYNAKLAR

1. Ibrahim, I.A., Mohamed, F.A., Lavernia, E.J., "Particulate Reinforced Metal Matrix Composites-a review", ***Journal of Materials Science,*** 26: 1137- 1156 (1991).

2. İnem, B., Gül, F., "Döküm yoluyla SiC takviyeli kompozitlerin geliştirilmesi", ***Uluslararası Katılımlı 2.Ulusal Toz Metalurjisi Konferansı,*** ODTÜ, Ankara, 999-1005 (1999).

3. Akoral, E., "Toz metalurjisi yöntemi ile Al-SiC kompozit malzeme üretimi ve işlenebilirliğinin incelenmesi", Doktora Tezi, ***Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü***, Manisa (2003).

4. Kök, M., "Metal Matrisli (Al_2O_3 takviyeli) Kompozit Malzemelerin Üretimi ve Seramik Takımlarla İşlenebilirliğin Araştırılması", Doktora Tezi, ***Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü,*** Elazığ (2000).

5. Türker, M., Özdemir, T. A., Ögel, B. ve Yavuz, A., "Al-SiC tozlarının mekanik alaşımlama değirmeninde öğütme zamanının kompozit toz yapısına etkisinin araştırılması" , ***Uluslararası Katılımlı 2. Ulusal Toz Metalujisi Konferansı***, ODTÜ, Ankara, 425-431 (1999).

6. İnternet: Türk Toz Metalurjisi Derneği, http://www.turktoz.gazi.edu.tr/ttmd.tr.htm, (2004).

7. Sarıtaş, S., "Toz Metalurjisi-Bileşik Gereçler-Seramikler", Makina Mühendisliği El Kitabı, ***Makina Mühendisler Odası Yayınları***, 1: 64-115 (1994).

8. Arık, H., Sarıtaş, S. ve Gündüz, M., "Production of Si_3N_4 by carbothermal reduction and nitridation of sepiolite", ***Journal of Materials Science***, 34:835-842 (1999).

9. Kadir, S., Arık, H., "Sepiyolitten Si_3N_4' e dönüşüm mekanizmaları", ***Turkish Journal of Engineering and Environmental Science***, TUBİTAK, 23: 287-298 (1999).

10. Asthana, R., "Processing effect on the engineering properties of cast metal matrix composites", ***Advanced Performance Materials***, 213-255 (1998).

11. Uslan, İ., "Gaz Atomize Alüminyum Tozlarının Özelliklerine Üretim Değişkenlerinin Etkisinin Araştırılması", Doktora Tezi, ***Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü***, Ankara (1999).

12. Arık, H., "Sepiolitten Karbo-Termal İndirgeme ve Nitrürleme Yoluyla Silisyum Nitrür (Si_3N_4) Seramik Tozu Üretimi ve Parametrelerinin Araştırlması", Doktora Tezi, ***Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü***, Ankara, 1-35 (1999).

13. Kurnaz, S. C., Akbulut, H., Durman, M., "Saffil (δ- Al_2O_3) fiber takviyeli çinko-alüminyum alaşımlı metal matrisli kompozitlerin infilitrasyon yöntemi ile üretimi ve özelliklerinin incelenmesi", ***7. Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi***, Ankara, 1155- 1163 (1993).

14. Özkök, Ö., "α- Si_3N_4 İçeren Alüminyum Matrisli Kompozit Malzeme Üretimi ve Özelliklerin Araştırılması", Yüksek Lisans Tezi, ***Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü,*** Ankara (2004).

15. Gökmusaoğlu, M., "Toz Metalurjisinde Presleme Tekniği –I-", ***Mühendis ve makine***, 12: 139, 284- 289 (1969).

16. Çiftçi, İ., "Alüminyum Esaslı Kompozitlerde Takviye Oranı ve Boyutunun Mekanik Özellikler ve İşlenebilirlik Üzerine Etkisinin Araştırılması", Doktora Tezi, ***Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü***, Ankara (2003).

17. Davidson, J., "Compressibility of Metal Powders", ***Quebec Metal Powders Ltd,*** London, 286- 287 (1996).

18. Bostan, B., "Alüminyum- Karbon Tozlarından Mekanik Alaşımlama ve Sonrası İşlemlerle Al_4C_3 Sentezlemesi", Doktora Tezi, ***Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü***, Ankara (2003).

19. Ekşi, A. ve Kurt, A. O, "Metal ve Seramik Tozlarının Bilgisayar Kontrollu Tek Eksenli Kalıpta Preslenmesi", ***Uluslararası Katılımlı 2. Ulusal Toz Metalujisi Konferansı***, ODTÜ, Ankara, 557- 563 (1999).

20. German, R. M., "Powder Metallurgy Science", ***Metal Powder Industries Federation***, 2nd edition, USA (1994).

21. Erdoğan, M., "Malzeme Bilimi ve Mühendislik Malzemeleri", ***Nobel Yayın Dağıtım,*** cilt-1, Ankara (1998).

22. Sümer, M., "Mekanik Alaşımlama ile Üretilen Fe- Fe_3C kompozit malzemede mekanik özelliklerin araştırılması", Yüksek Lisans Tezi, ***Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü***, Ankara (2004).

23. Wilyman, P. P., "Sintering With Nitrojen Based Atmospheres", ***Powder Metallurgy***, 28, 85- 87 (1995).

24. Brazenha. M V. J., "Furnace Atmospheres For Sintering", ***MPR,*** 600- 604 (1990).

25. Kaufman, S. M., "Carbon Control During The Sintering Of Iron", ***International 5. Powder Metallurgy***, 11- 16 (1973).

26. "Metals handbook", ***7. Powder Metallurgy, A.S.M,*** 9. Baskı, USA (1984).

27. Schwartz M.M., "Composites Materials Handbook", ***Mc Graw- Hill Book Company***, New York (1984).

28. Şahin, Y., "Kompozit malzemelere giriş", ***Gazi Kitapevi,*** Ankara (2000).

29. Lubin, G., Handbook of Composites, ***Van Nostrad Reinhold Co***., 196 (1982).

30. Taya, M. and Arsenault, R. J., "Metal Matrix Composites- Thermal and Mechanical Behavior", ***Pergamon Pres***, New York (1988).

31. Lin, R. Y., "Composite Interfacial Reactions", ***JOM***, 20-23 (March 1993).

32. Aydın, M., "SiC Parçacık Takviyeli 7075 Alüminyum Alaşım Matrisli Kompozit Malzemelerin Difüzyon Kaynağı", Doktora Tezi, ***Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü***, Ankara, 10-12 (2003).

33. Onat, A., "In-Situ Kompozit Üretim Teknikleri ve XD Sentezi Yöntemi", ***Teknik Yazı, Metal Dünyası,*** 113: 49-53 (Ekim 2002).

34. Lilholt, H., "Aspect of Deformation of Metal Matrix Composites", ***Materials Science and Engineering***, A135, 161- 171 (1991).

35. Trumper, R. L., "Metal Matrix Composites- Applications and Prospects", ***Metals and Materials***, 3: 662- 667 (1987).

36. Hiçyılmaz, N., "Toz Metalurjisi Yöntemleri ile Elde Edilen Seramik Tanecik Destekliyicili Alüminyum Esaslı Tanecikli Kompozit Malzemelerin Aşınma Özellikleri", Yüksek Lisans Tezi, ***Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü,*** Ankara (1999).

37. Çıtak, R., "Metalik Baryum-Alüminyum Başlangıç Tozlarının Düşük Sıcaklıkta Oksidasyonu ile Alüminyum Matrisli Kompozit Üretimi", Doktora Tezi, ***Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü,*** Ankara (1998).

38. Başçı Ü.G., "Al_2O_3 Partikül Takviyeli Al- Cu Esaslı Metal Matriksli Kompozit Malzeme Üretimi", Yüksek Lisans Tezi, ***İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü***, İstanbul (1999).

39. Eliasson, J., Sandstrom, R., "Applications of Alüminum Matrix Composites", "Metal Matrix Composites Part I: Applications and Processing", ***Hobbs The Printers Ltd,*** U.K (1995).

40. Sur, G., "Alüminyum esaslı kompozitlerin üretimi ve işlenebilirliğinin incelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, ***Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü,*** Ankara, 3- 42 (2002).

41. Erdoğan, M., "Malzeme Bilimi ve Mühendislik Malzemeleri", ***Nobel Yayın Dağıtım,*** Ankara, Cilt:2, 460-485 (1998).

42. Şahin, Y., "The Mechanical and Wear Behaviour of B(SiC) Fibre- Reinforced Composite Materials", Ph. Thesis, ***The Universty of Aston,*** Birmingham, United Kingdom (1994).

43. Acılar, M., "Al/ SiC Kompozitlerin Vakum İnfilitrasyon Yöntemi ile Üretimi ve Aşınma Davranışlarının Araştırılması", Doktora Tezi, ***Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü,*** Ankara, 17-34 (2002).

44. Demirkesen, E., "Kompozit Malzemeler", ***İstanbul Teknik Üniversitesi Kimya-Metalurji Fakültesi Yayınları***, İstanbul (1991).

45. Mutlu, İ., "Alüminyum Matrisli Metal Kompozit Malzemelerin Üretilmesi", Yüksek Lisans Tezi, ***Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü,*** Ocak (1996).

46. Klipfel, Y. L., He, M. Y., Mcmeeking, R. M., Evans, A. G., Mehrabian, R., "The Processing and Mechanical Behavior of an Aluminium Matrix Composite Reinforced with Short Fibers", ***Acta Metal. Mater.***, 38 (6): 1063- 1074 (1990).

47. Zhu, Z., "A Literature Survey on Fabrication Methods of Cast Reinforced Metal Composites", ***ASM/TMS Comitte, World Materials congress,*** Chicago- Illions, USA, 93-99 (1988).

48. Huda, M. D., Hashmi, M. S. J., "MMC_s Materials, Manufacturing and Mechanical Properties", Metal Matrix Composites part I: Application and processing, ***Hobbs The Printers Ltd***., U.K., 37- 63 (1995).

49. Aydın, B., "AA 2014 Alaşımında Yaşlandırma Isıl İşlemleri ile Değiştirilen İşlenebilirlik Özelliklerinin İncelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, ***Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri*** **Enstitüsü,** Ankara (2002).

50. Özçatalbaş, Y., Ercan, F., "Talaşlı imalatta İşlenebilirlik ve işlenebilirliğin ölçülmesi", ***Standart Dergisi,*** 84 (1996).

51. Özçatalbaş, Y., "1050,4140 ve 8620 Çeliklerinin Isıl İşlemle Değişen Mikroyapı Ve Mekanik Özelliklerine Bağlı İşlenebilirlikleri", Doktora Tezi, ***Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü,*** Ankara, 52-169 (1996).

52. Mills, B., Redford, A. H., "Machinability of Engineering Metarials", *Applied* ***Science Publishers Ltd.,*** New York (1993).

53. Özçatalbaş, Y., "Mühendislik malzemelerinin işlenebilirliği", ***Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metal Eğitimi Bölümü,*** Ankara, 1-70 (2003).

54. Tokuroğlu, T. N., Anlağan, Ö., "Talaşlı Üretimde İşlenebilirlik Kavramı Ve Tornalama İşlemleri İçin İşlenebilirlik Veri Tabanı Uygulaması", ***Mühendis ve Makine Dergisi,*** 398: 34 (1993).

55. Baş, A., "Basınçlı Hava ile Soğutma Ortamının Talaş Kaldırma Mekaniğine Etkilerinin Araştırılması", Yüksek Lisans Tezi, ***Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü***, Ankara (2004).

56. Kopac, J., Bahor, M., "Interaction Of The Workpiece Metarials Technological Past And Machining Parameters On Desired Quality Of The Product Surface Roughness", ***Journal of Metarials Processing technology,*** 109: 105-111 (2001).

57. Çakır, M. C., "Modern Talaşlı İmalatın Esasları", ***Vipaş A. Ş***., 32-45 (1999).

58. Şahin, Y., "Talaş kaldırma prensipleri,1. Cilt", Genişletilmiş ve Gözden Geçirilmiş 2. Baskı, ***Nobel Yayıncılık Ltd. Şti.,*** Ankara, 170- 306 (1993).

59. Asil Çelik A.Ş., "İşlenebilirlik ve kalsiyum uygulaması", ***Ful Ajans ve Tanıtım Hizmetleri A.Ş***., Teknik Yayınlar, 3, Ankara, 1-25 (1994).

60. Liew, W.Y.H., Hutchings, I. B., Williams, J. A., "The Interaction Between Tool Metarial, Environment And Processes Conditions In The Machining Of Aluminium Alloy", ***Machining Science and Tecnology,*** 3:273-286 (1999).

61. Boothroyd, G., "Fundamentals of Metal Machining and Machine Tools", Singapore (1987).

62. Kalpakjian, S., "Manufacturing Processes For Engineering Metarials 2nd ed.", USA (1991).

63. Şeker, U., "Takım tasarımı", ***Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Eğitimi Bölümü,*** Ankara, 1-150 (2003).

64. Dieter, E,G., "Mechanical Metalugy", Chapter Twenty One, Machining of Metals, ***Mc Graw- Hill***, U.S.A., 701- 725 (1982).

65. Özdemir, A., "Tornalanmış Parçalarda Kesici Uç Biçimine ve İlerlemeye Bağlı Yüzey Pürüzlülüğü", G.Ü.T.E.F. Dergisi, Ankara, Cilt 1, Sayı 1 (1987).

66. Aydın, E., "Bir Tezsan Tornada MKE Ç 1050- BÖHLER SPUN 120308 Çiftinin Kesme Hızı – Kalem Ömrü İlişkisinin Tayini", Yüksek Lisans Tezi, ***Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü***, Ankara (1989).

67. Gülsoy, H. Ö., "Fe- Cu- C Kompaktlarına Katılan İlave C Miktarının İşlenebilirlik Üzerine Etkisi", ***Uluslararası Katılımlı 2. Ulusal Toz Metalujisi Konferansı***, ODTÜ, Ankara, 475-481 (1999).

68. Özçatalbaş, Y., Türker, M., "PM 2000 Süperalaşımında İşlenebilirlik Problemleri", ***3. Uluslar arası İleri Teknolojiler Sempozyumu***, Ankara (2003).

69. Chambers, A. R. and Stephens, S. E., "Machaning of Al-5Mg Reinforced with 5 vol. % Saffil and 15 vol. % SiC, ***Materials Sicience and Engineering,*** A135, 287-290 (1991).

70. Quan, Y. M., Zhou, Z. H. And Yue, B. Y., "Cutting Process and Chip Appearence of Aluminium Composites Reinforsed by SiC Particle", ***Journal of Materials Processing Technology***, 231-235 (1999).

71. ASTM B 312- 96, "Standart Test Method for Gren Strength for compacted Metal Powder Specimens", ***ASTM International***, USA 89-91

72. TS 10329, "Torna Kalemleri- Ömür Deneyi", ***Türk Standartları Enstitüsü***, 1-54 (1992).

73. Yeo, S. H., Lui, W. W., Phung V., "A Quick-Stop Device For Orthogonal Machining", ***Journal of Materials Processing Technology***, Vol: 29 (1992).

74. Lin, J. T., Bhattacharyya, D. And Ferguson, W. G., "Chip Formation in the Machining of SiC-Particle-Reinforced Aluminium Matrix Composites", ***Sicience and Technology***, 58, 285- 291 (1998).

75. Arık, H., Türker, M. ve Sarıtaş, S., "Mekanik Alaşımlama ile Aluminyum Matriksli Aluminyum Karbür (Al_4C_3) Kompozit Malzeme Üretimi", ***Uluslararası Katılımlı 2. Ulusal Toz Metalujisi Konferansı***, ODTÜ, Ankara, 433-440 (1999).

76. Özçatalbaş, Y. ve Arık, H., "Mekanik Alaşımlama Yöntemi ile Üretilen Al-Al_4C_3 Kompozit Malzemenin İşlenmesinde Talaş Oluşumu", ***3. Uluslararası Toz Metalurji Konferansı***, Gazi Üniversitesi, Ankara, 827-834 (2002).

77. Katayama, Sakae. ve Hashimura, M., Çeviren: Özçatalbaş, Y., "Çelikteki Karbon, Fosfor ve Azot' un Kesme Kuvveti ve İşlenen Yüzeyin Pürüzlülüğüne etkisi", ***Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Dergisi***, 5, (1-2): 71-82.

78. Özçatalbaş, Y., "Investigation of the Machinability Behaviour of Al_4C_3 Reinforced Al-Based Composite Produced by Mechanical Alloying Technique", ***Composites Science and Technology***, 63, 53-61 (2003).

79. Tomac, N. And Tonnessen, K., "Machinability of Particulate Aluminium Matrix Composites", ***Annals of the CIRP***, 41, 1, 55-58 (1992).

80. El-Gallab, M., Sklad, M., "Machining of Al/SiC Particulate Metal-Matrix Composites, Part I: Tool Performance", ***Journal of Materials Processing Technology***, 83, 151-158 (1998).

81. Akbulut, H., "Alümina Fiber Takviyeli Al-Si Metal Matrisli Kompozitlerin Üretimi ve Mikroyapı-Özellik ilişkisinin İncelenmesi", Doktora Tezi, ***İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü***, İstanbul (1994).

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı	: BAHÇECİ, Ersin
Uyruğu	: T.C.
Doğum tarihi ve yeri	: 23.05.1981 İskenderun
Medeni hali	: Bekar
Telefon	: --
Faks	: --
e-mail	: ersinb81@hotmail.com.

Eğitim

Derece	**Eğitim Birimi**	**Mezuniyet tarihi**
Lisans	Gazi Üniversitesi/ Metal Öğretmenliği	2003
Lise	İskenderun Anadolu ve End. Meslek Lisesi/ Metal İşleri	1998

İş Deneyimi

Yıl	**Yer**	**Görev**
2005-2006	Gazi Üniversitesi	Teknik Öğretmen

Yabancı Dil

İngilizce