

MİKRO FREZELEME İŞLEMİNDE KESME
PARAMETRELERİNİN YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜ
ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ERÇİN TÜTÜNSATAR

DANIŞMAN

Doç. Dr. Kubilay ASLANTAŞ

MAKİNE EĞİTİMİ ANABİLİM DALI

HAZİRAN 2010

Bu tez çalışması 07.TEF.05 numaralı proje ile AKÜ BAPK tarafından desteklenmiştir

AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**MİKRO FREZELEME İŞLEMİNDE KESME PARAMETRELERİNİN YÜZEY
PÜRÜZLÜLÜĞÜ ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI**

ERÇİN TÜTÜNSATAR

DANIŞMAN

Doç. Dr. Kubilay ASLANTAŞ

MAKİNE EĞİTİMİ ANABİLİM DALI

HAZİRAN, 2010

ONAY SAYFASI

Doç. Dr. Kubilay ASLANTAŞ danışmanlığında,
Erçin TÖTÜNSATAR tarafından hazırlanan
“Mikro Frezeleme İşleminde Kesme Parametrelerinin Yüzey Pürüzlülüğü
Üzerindeki Etkisinin Araştırılması” başlıklı bu çalışma, lisansüstü eğitim ve öğretim
yönetmeliğinin ilgili maddeleri
uyarınca

24 / 05 / 2010

tarihinde aşağıdaki jüri tarafından
Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Eğitimi Anabilim Dalında
Yüksek Lisans tezi olarak oybirliği ile kabul edilmiştir.

Ünvanı, Adı, SOYADI

İmza

Başkan : Doç.Dr. Şükrü TAKTAK

Üye : Doç.Dr. Kubilay ASLANTAŞ

Üye : Yrd.Doç.Dr. İsmail UCUN

Afyon Kocatepe Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun
...../...../..... tarih ve
..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Doç.Dr. Rıdvan ÜNAL
Enstitü Müdürü

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖZET	IV
ABSTRACT	V
TEŞEKKÜR	VI
SİMGE VE KISALTMALAR DİZİNİ	VII
ŞEKİLLER DİZİNİ	VIII
RESİMLER DİZİNİ	X
ÇİZELGELER DİZİNİ	XII
1. GİRİŞ	1
1.1 Çalışmanın Amacı	2
2. GENEL BİLGİLER	3
2.1. Literatür özetleri	3
2.2. Genel Mikro Üretim Teknikleri	15
2.2.1. Yüzey Mikro işleme	16
2.2.2. Gövde Mikro İşleme	18
2.2.3. Geliştirilmiş LIGA İşlemi	19

2.2.4. Elektro Erozyonla Mikro işleme	21
2.2.5 Lazerle Mikro İşleme	21
2.3. Mikro Frezeleme	22
2.3.1. Kullanılan Mikro Freze Tezgâhları ve Özellikleri	23
2.3.2. Kullanılan Kesici Takımlar ve Özellikleri	26
2.3.2.1 Kesici Takım Malzemesi	26
2.3.2.2 Kesici Takım Kaplamaları	27
2.3.2.2.1 TiN Kaplama	27
2.3.2.2.2 Zafır (AlTiN-TiAlN) Kaplama	28
2.3.2.3 Kesici Takım Geometrisi	29
2.3.3 Mikro Frezelemede Talaşın Oluşumu ve Minimum Talaş Derinliği	31
2.3.4 Mikro Frezelemede Kesme Kuvvetleri	34
2.3.5 Mikro Frezelemede Takım Ömrü ve Aşınmayı Etkileyen Faktörler	38
2.3.6 Mikro Frezelemede Yüzey Pürüzlülüğü ve Etkileyen Faktörler	40
 3. MATERYAL VE METOD	46
3.1 CNC Takım Tezgâhı İmalatı	46
3.1.1 Step Motor ve Sürücü Devresi	47
3.1.2 Kullanılan Ara Yüz Programı	48
3.1.3 Spindle Motor	49
3.1.4 Bilyeli Vidalar ve Lineer Kaymalı Yataklar	50
3.1.5 Makine Gövdesi	51
3.2 Deneylerde Kullanılan Kesici Takım ve Malzemeler	52
3.3 Kesme Parametreleri	54
3.4 Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümü	55

3.5 Takım Aşınmasının Ölçümü	56
4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	58
4.1 Kesme Parametrelerine Bağlı Yüzey Pürüzlülük Değerleri	58
4.1.1 İlerlemenin Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi	58
4.1.2 Talaş Derinliğinin Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi	61
4.2 Takım Aşınması.....	63
4.2.1 Takım Bazında Aşınma Ölçüm Sonuçları	64
4.2.2.Genel Kesici Ağız ve Kenar Aşınması Sonuçları.....	67
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	70
5.1 Öneriler	71
6. KAYNAKLAR	72
6.1 İnternet Kaynakları	77
7. ÖZGEÇMİŞ	78

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

MİKRO FREZELEME İŞLEMİNDE KESME PARAMETRELERİNİN YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜ ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

Erçin TÜTÜNSATAR

**Afyon Kocatepe Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Eğitimi Anabilim Dalı**

Danışman: Doç. Dr. Kubilay ASLANTAŞ

Bu çalışmada, AISI 1045 iş parçası malzemesinin farklı mikro kesici takımlar ile frezelenmesi işleminde, yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınması kriterleri incelenmiştir. Mikro frezeleme işlemleri tarafımızca imal edilen CNC dik işlem tezgâhında yapılmıştır. Frezeleme işlemlerinde kaplamasız (WC), Titanyum Alüminyum Nitrür (AlTiN) ve Titanyum Nitrür (TiN) kaplamalı kesici takımlar kullanılmıştır. Yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınmasının belirlenmesinde farklı ilerleme oranları ve talaş derinliklerinde kesme parametreleri kullanılmıştır. Yüzey pürüzlülük değerleri perthometre cihazı ile ölçülmüştür. Takım aşınmaları ise USB elektronik mikroskop yardımı ile belirlenmiştir.

Elde edilen sonuçlara göre en iyi yüzey pürüzlülük değeri AlTiN kaplamalı freze ucu ile 0.129 µm olarak 15 µm talaş derinliği ve 250 mm/dak ilerleme hızında elde edilmiştir. Ayrıca artan ilerleme talaş derinliğine bağlı olarak, her bir kesici takım için ortalama yüzey pürüzlülük değerleri de artmaktadır. Yüzey pürüzlülüğü açısından değerlendirildiğinde, en iyi performansı AlTiN kaplı kesici takım göstermiştir. Buna karşın kaplamasız ve TiN kaplı kesici takım için elde edilen yüzey pürüzlülük değerleri birbirine yakın olarak gerçekleşmiştir.

2010, 78 Sayfa

Anahtar kelimeler: Mikro frezeleme, Yüzey pürüzlülüğü, Takım aşınması

ABSTRACT

M.Sc.Thesis

INVESTIGATION OF EFFECTS OF CUTTING PARAMETERS ON SURFACE ROUGHNESS IN MICRO MILLING PROCESS

Erçin TÜTÜNSATAR

**Afyon Kocatepe University
Institute for the Natural and Applied Sciences
Machine Education Department**

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Kubilay ASLANTAŞ

In this study, AISI 1045 workpiece materials with different micro-cutting tools in milling operations, surface roughness and tool wear criteria were examined. Micro milling CNC vertical processing machines were manufactured by us are made. Milling operations uncoated (WC), Titanium Aluminum Nitride (AlTiN) and Titanium Nitride (TiN) coated cutting tools are used. Surface roughness and tool wear rate and cutting depth on progress in determining the different parameters used in the cutting. Perthometre surface roughness values were measured with the device. Of tool wear was determined with the help of the USB electronic microscope.

According to the results obtained the best surface roughness value of coated AlTiN milling machining tip $0.129\text{ }\mu\text{m}$, $15\text{ }\mu\text{m}$ depth and 250 mm / min feed rate was obtained. Also, depending on the increasing depth of machining progress, the average surface roughness value for each cutting tool is also increasing. When evaluated in terms of surface roughness, showed the best performance of the AlTiN-coated cutting tools. Whereas for uncoated and TiN-coated cutting tool surface roughness value obtained was close to one another.

2010 , 78 Pages

Key words: micro-milling, surface roughness, tool wear.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın gerçekleşmesinde yapmış olduğu çok değerli katkı ve yönlendirmeler ile bana büyük destek veren ve elinden gelen yardımı esirgemeyen danışman hocam Doç. Dr. Kubilay ASLANTAŞ'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Makinenin tasarım ve imal aşamasında birlikte çalıştığımız Mashar CEVİNDİK'e, Öğr. Gör. Barış Gökçe'ye, deney ekipmanlarının kullanılmasında desteklerini esirgemeyen Arş. Gör. İrfan Uzun'a, ilgilerinden dolayı BAPK personeline, tezin hazırlanması aşamasında, manevi desteğini esirgemeyen değerli eşim ve kızlarıma en içten teşekkürlerimi sunarım.

Erçin TÜTÜNSATAR
Afyonkarahisar, 2010

SİMGE VE KISALTMALAR DİZİNİ

1. Simgeler

WC	Tungsten Karbür
TiAlN	Titanyum Alüminyum Nitrür
TiN	Titanyum Nitrür
Å	Angstrom
µm	Mikrometre
nm	Nanometre
WC-Co	Tungsten Karbür-Kobalt
Si ₃ N ₄	Silisyum Nitrür
Cl ₂	Klor
SiCl ₄	Silisyum Klorür
Al	Alüminyum
Co	Kobalt
WCu	Tungsten-Bakır

2. Kısaltmalar

AKÜ	Afyon Kocatepe Üniversitesi
BAPK	Bilimsel Araştırma Projesi Komisyonu
CNC	Computer Numerically Controlled (Bilgisayarlı Sayısal Kontrol)
LİGA	Lithographie Galvanoformung Abformung (Litografik Elektro-Presle Kalıplama)
MEMS	Micro-Electro-Mechanical Systems (Mikro-Elektro-Mekanik Sistemler)
HMM	Hidden Markov Modeli
HRC	Hardness Rockwell C Scale
UFG	Ultra Fine Grained (Ultra İnce Dokulu)
CG	Coarse Grained (Kaba Dokulu)
EDM	Electro Discharge Machining (Elektro Erezyonla İşleme)
SEM	Scanning Electron Microscopy (Elektron Taramalı Mikroskop)
OFHC	Oxygen Free High Conductive copper (İletkenliği Yüksek Bakır)
ASTM	American Society for Testing and Materials (Amerika Malzeme Test Merkezi)

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa No
Şekil 2.1 Zamana bağlı olarak işleme yönüne paralel yüzey pürüzlülüğünün değişimi. .	4
Şekil 2.2 Zamana bağlı olarak işleme yönüne dik yüzey pürüzlülüğünün değişimi.	4
Şekil 2.3 Mikro frezeleme işleminde kesme esnasında meydana gelen sıcaklığın dağılımı	5
Şekil 2.4 Kesici takım ile kesme işleminde talaş oluşumu.	7
Şekil 2.5 İlerleme hızına bağlı yüzey pürüzlülüğü değişimi	9
Şekil 2.6 CG ve UFG Al 508 için farklı kesme koşullarında elde edilen yüzey pürüzlülükleri.....	11
Şekil 2.7 Bakır 101 malzemesi üzerine açılan kanalın yüzey pürüzlülük değerlerinin ilerlemeye bağlı değişimi.....	13
Şekil 2.8 EDM yöntemi ile imal edilen mikro kesici takımı.	14
Şekil 2.9 Yüzey mikro işleme tekniği işlem sırası.	17
Şekil 2.10 Geliştirilmiş LIGA tekniği işlem sırası.	20
Şekil 2.11 Takım malzemelerinin sıcaklığa bağlı sertliklerinin değişimi	26
Şekil 2.12 Mikro freze ucu geometrisi.	30
Şekil 2.13 Mikro frezelemede minimum talaş derinliği	32
Şekil 2.14 Perlit malzemede kesme kuvvetleri ile minimum talaş derinliğinin tespiti ..	32
Şekil 2.15 Kesici uç yarıçapının minimum talaş derinliğine etkisi	33
Şekil 2.16 Bölgesel kesme	34
Şekil 2.17 Mikro frezeleme işlemi sırasında talaş derinliği ve düzlemsel kuvvetler.	36
Şekil 2.18 AISI 4340 çelik malzemede oluşan kesme kuvvetleri	36
Şekil 2.19 130 m/dak kesme hızı ve 3 µm talaş derinliği için X ve Y yönündeki kesme kuvvetlerinin değişimi	37
Şekil 2.20 240 m/dak kesme hızı ve 3 µm talaş derinliği için X ve Y yönündeki kesme kuvvetlerinin değişimi	37
Şekil 2.21 Farklı ilerleme değerleri için takım çapındaki azalmaya bağlı aşınma değerleri	40
Şekil 2.22 Uç yarıçapının ve dış başına ilerlemenin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisi.....	41

Şekil 2.23 OFCH, Pirinç ve Alüminyum için talaş derinliğine bağlı yüzey pürüzlülüğü	42
Şekil 2.24 52 HRC AISI H11 sertleştirilmiş kalıp çeliği için yüzey pürüzlülüğünün işlenen yüzey boyunca değişimi	43
Şekil 2.25 Kesme parametrelerine bağlı yüzey pürüzlülüğünün değişimi	44
Şekil 2.26 Al 6061 malzemenin tane yapısının yüzey pürüzlülüğüne etkisi.	45
Şekil 3.1 Kesme işlemlerinde kullanılan mikro freze kesici takım.	53
Şekil 4.1 Kaplamasız karbür kesici takım için ilerleme ve talaş derinliğine bağlı yüzey pürüzlülüğünün değişimi.	59
Şekil 4.2 TiN kaplamalı kesici takım için ilerleme ve talaş derinliğine bağlı yüzey pürüzlülüğünün değişimi.	60
Şekil 4.3 AlTiN kaplamalı kesici takım için ilerleme ve talaş derinliğine bağlı yüzey pürüzlülüğünün değişimi.	61
Şekil 4.4 $a=0,10$ mm için talaş derinliği için yüzey pürüzlülüğünün ilerlemeye ve takım türüne bağlı değişimi.	62
Şekil 4.5 $a=0,15$ mm için talaş derinliği için yüzey pürüzlülüğünün ilerlemeye ve takım türüne bağlı değişimi.	62
Şekil 4.6 $a=0,10$ mm için talaş derinliği için yüzey pürüzlülüğünün ilerlemeye ve takım türüne bağlı değişimi.	63
Şekil 4.7 Kaplamasız kesici uç aşınmaları, (a) Kesici ağız ve (b) Kesici kenar.	63
Şekil 4.8 Farklı ağız ve kenar sayılarına bağlı olarak takım aşınması (WC).	65
Şekil 4.9 TiN kaplamalı freze ucu kesici ağız ve kenar aşınması sonuçları.	66
Şekil 4.10 AlTiN kaplamalı freze ucu kesici ağız ve kenar aşınması sonuçları.	66
Şekil 4.11 Takım bazında kesici ağız aşınması sonuçları.	67
Şekil 4.12 Takım bazında kesici kenar aşınması sonuçları.	68

RESİMLER DİZİNİ

Sayfa No

Resim 2.1 Bir mikro freze takımında meydana gelen aşınma (Takım çapı 800 µm, işleme zamanı 240 sn)	6
Resim 2.2 Çıkış çapakları, (a) Alüminyum, (b) Çelik, (c) Bakır	6
Resim 2.3 Araba tekerleği modeli çelik kalıp boşluğu (52 HRC) ve çentikli kenar detayı.....	8
Resim 2.4 Talaş kaldırmadan sonra mikro takımında meydana gelen çap azalması	13
Resim 2.5 Kaplamasız mikro frezede, (a) İşleme sonrasında kesiciye yapışan Alüminyum talaşları, (b) Kaplamasız freze ucu mikro yapısı	15
Resim 2.6 Elmas kaplamalı mikro frezede, (a) İşleme sonrası kesici ucu, (b) Freze ucu mikro yapısı	15
Resim 2.7 Biyomedikal sektöründe kullanılan mikro parçalar	16
Resim 2.8 Silisyum yüzey mikro-işleme tekniğiyle üretilmiş elektro statik mikro motor sistemi	18
Resim 2.9 Çözülmüş pul tekniğiyle elde edilen elek tipi elektrot	19
Resim 2.10 Geliştirilmiş LIGA tekniğiyle üretilmiş mikro parçalar, (a) Elektro statik tarak sistemi ve (b) Mikro motor	20
Resim 2.11 Kompozit WCu dalma erezyon elektrotları.....	21
Resim 2.12 Mikro freze tasarımları (a) Köprü tipi CNC, (b) C tipi CNC	23
Resim 2.13 Ticari kulvarda kullanılan mikro freze tezgâhları	24
Resim 2.14 Pnömatik destekli anahtarsız mandren tutuculu iş mili	25
Resim 2.15 Mikro freze takım değiştirme ve sıfırlama (a) Robot kol ile takım değiştirme, (b) Takım magazini, (c) Lazer ile sıfırlama	25
Resim 2.16 Araştırma için üretilen mikro freze uçları	31
Resim 2.17 TiAlN kaplamalı WC mikro freze takımının aşınması.....	38
Resim 2.18 Kesme hızına bağlı takım aşınması, a) Kesme hızı 130 m/dak, b) Kesme hızı 240 m/dak	39
Resim 2.19 İlerlemeye bağlı aşınma durumu	39
Resim 2.20 Al 6061 malzemenin işlenmiş yüzeye ait SEM fotoğrafı.....	45
Resim 3.1 İmalatı yapılan CNC tezgâhı.	46
Resim 3.2 Tezgâhın eksen hareketlerinde kullanılan bipolar step motor.	47

Resim 3. 3 Kullanılan arayüz programı	49
Resim 3.4 Spindle motor.	50
Resim 3.5 Hassas bilyeli mil ve somunu.	51
Resim 3.6 Doğrusal kaymalı yatak.	51
Resim 3.7 Tekrarlanabilirlik hassasiyeti ölçümü.	52
Resim 3.8 İş parçasının bağlanması ve kontrolü.	54
Resim 3.9 Deney parçası üzerine açılan kanallar	56
Resim 3.10 Yüzey pürüzlülüğünün tezgah üzerinde ölçülmesi	56
Resim 3.11 Mikro kesici takımda meydana gelen aşınmanın ölçülmesi	57
Resim 4.1 AlTiN kaplamalı ikinci takımda meydana gelen aşınma ve kesici kenar kırılmaları	64
Resim 4.2 Kesici geometrisine bağlı aşınma, a) AlTiN kaplamalı birinci tip mikro freze, b) AlTiN kaplamalı ikinci tip mikro freze, (60x büyütme).	69

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa No
Çizelge 2.1 TiN kaplama kimyasal özellikleri (İnt. Kyn.4).	28
Çizelge 2.2 AlTiN kaplama kimyasal özellikleri (İnt. Kyn.4).	29
Çizelge 3.1 Step motorun teknik özellikleri.	48
Çizelge 3.2 Spindle motorun teknik özellikleri.	50
Çizelge 3.3 Mikro freze kesici takıma ait geometrik boyutlar.	53
Çizelge 3.4 AISI 1045 malzemenin kimyasal bileşimi.	53
Çizelge 3.5 Yüzey pürüzlülüğü deneylerinde kullanılan kesme parametreleri.	55

1. GİRİŞ

Günümüzde optik, elektronik, biyomedikal, iletişim teknolojisi, otomotiv ve havacılık gibi sektörlerde özel mikro parçaların üretimine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu özel uygulamalar mikro yakıt hücreleri, mikro kimyasal reaktörler, mikro pompa, valf ve karıştırma cihazları, mikro akışkan sistemleri, fiber optik, jetler, mikro kalıplar ve derin X-ray (X Işını) litografi maskelerinin üretimi gibi birçok ihtiyaç doğurmuştur (Liu, DeVor, Kapoor and Ehmann, 2004, Rodriguez and Perez, 2008).

Gün geçtikçe artan ihtiyaç karşısında bu mikro parçaların üretilmek istenmesi, zaman içinde aşındırma yöntemleri ve LIGA (Lithographie Galvanoformung Abformung) süreci gibi MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) teknolojilerinin doğmasına neden olmuştur (Takács, Verő and Mészáros, 2003). Ancak bu yöntemler gelişen teknolojik imkânlarla rağmen malzeme yelpazesi, geometrik özgürlük gibi sınırlamalara karşı çaresiz kalmıştır. Gelişen mikro üretim teknolojisi, fonksiyonel ve yapısal gereksinimleri çok dar toleranslar gerektiren Paslanmaz Çelik, Titanyum, Pirinç, Alüminyum, Platin, İridyum, Plastik ve Seramik gibi çeşitli mühendislik kompozit malzemelerin kullanımını gerektirmektedir (Liu, DeVor, Kapoor and Ehmann, 2004).

Yüksek geometrik karmaşıklığı, işlenebilir malzeme yelpazesi, serbest form ve yüksek boy oranları ile üç boyutlu mikro yapıların üretilmesinde yüksek tolerans aralığı sunması, mikro frezelemeyi diğer mikro işleme teknikleri yanında avantajlı bir konuma yükseltmektedir. Mikro frezeleme genellikle 100 mikron ile 800 mikron çap arasındaki kesici ile işlem yapan geleneksel frezelemenin küçültülmüş bir versiyonudur (Zhu, Wong and Hong, 2009). Fakat geleneksel frezelemeden ayırt edici özellikleri mikro frezelemeyi çok özel kılmaktadır. Yüksek kesme hızında işleme, takım aşınması, takım boyutu ve kesici kenar radyüsü, mikro frezelemeyi ayırt eden özelliklerdendir.

Mikro talaş kaldırma işlemi yeni bir işleme metodu ve teknolojisi olması nedeni ile birçok sorunla karşılaşmaktadır. Bu sorunların en önemlisi işlenen malzemelerin sert olmasıdır. Kesici uçların kesme derinliğinin çok küçük olması nedeniyle termal deformasyona maruz kalıp, erken takım kırılması, aşınma gibi olumsuzlukları

beraberinde getirmektedir. Bu da yüzey kalitesini ve verimliliği önemli ölçüde etkilemektedir. Minyatür parçaların gerçekleştirilmesinin yanında, oluşturulan yüzeylerin kalitesinin iyi olması parçanın işlevselliği açısından çok önemlidir (Bissacco, Hansen and Chiffre, 2006). Bu yüzden uygun işleme değişkenlerinin seçilerek, işlenmiş yüzey kalitesini artırmak ve uygulama alanını daha fazla genişletmek gerekmektedir. Ayrıca fabrika ve atölye düzeyindeki teknisyenler ile diğer çalışanların, işleme parametrelerini kendi deneyim ve deneme yanılma yaklaşımı ile çözmeye çalıştıkları bilinmektedir. Bu yöntemler ek üretim maliyeti ve kıdemli gereksinimi tetiklemektedir (Wang, Gong, Shi and Abba, 2009).

Bu nedenle araştırmanın, yeni bir teknoloji olan mikro frezeleme ile imalat yönteminde çalışanlara kılavuzluk etmesi hedeflenmiştir. Çalışmada AISI 1045 malzemesi üzerinde farklı ilerleme ve talaş derinlikleri kullanılarak yapılan deneylerde yüzey pürüzlülük haritası çıkartılmaya çalışılmıştır. Ayrıca kuru kesme şartları altında farklı kaplama teknikleri kullanılarak üretilmiş mikro freze kesicilerin davranışları araştırılmıştır.

1.1 Çalışmanın Amacı

Bu tez çalışmasının birçok amacı bulunmaktadır;

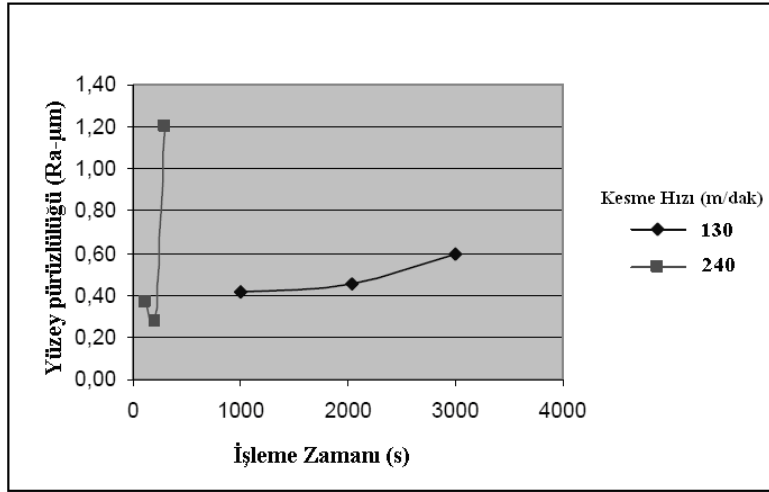
- Deneylerde kullanılacak olan bilgisayar kontrollü tezgâhın tasarlanması ve imal edilmesi,
- Farklı mikro kesici takımlara ve kesme parametrelerine bağlı olarak yüzey pürüzlülüklerinin elde edilmesi,
- Kesici takımların aşınmalarının incelenmesi,
- Sonuçların değerlendirilmesi.

2. GENEL BİLGİLER

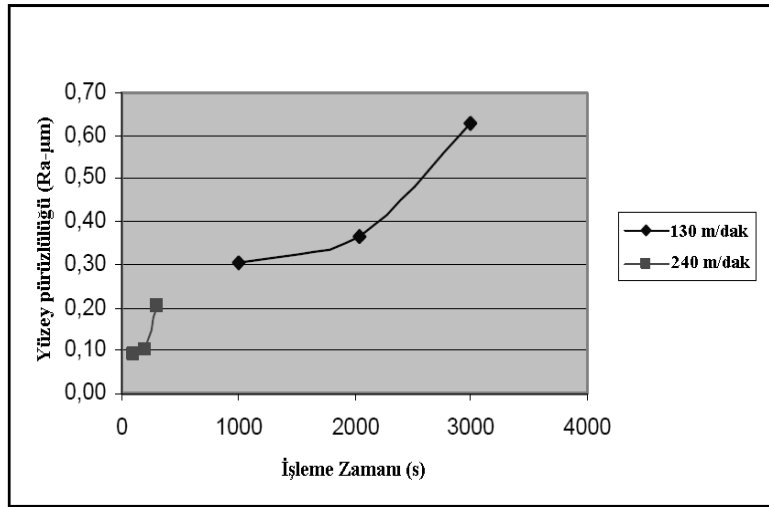
2.1. Literatür özetleri

Lee and Dornfeld'in yaptıkları araştırmada mikro frezelemede yüzey pürüzlülüğünü etkileyen faktörler ve bunlar arasındaki ilişkiler incelenmiştir. Makro ölçekte düşünüldüğünde MEMS üretim tekniklerine göre daha zor olduğu, fakat birbirini tamamlayıcı teknikler olduğu ifade edilmiştir. Mikro frezelemenin yeri, yüksek yüzey kalitesinde son frezeleme olarak gösterilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda yüzey pürüzlülüğünü, kesme hızı ve talaş derinliğine bağlı olarak değiştiği görülmüştür. Talaş derinliğinin artması ile yüzey pürüzlülük değerleri önemli ölçüde artarken kesme hızının artışında ise yüzey pürüzlülük değerleri önemli ölçüde azalmıştır (Lee and Dornfeld, 2004).

Rodriguez et al. mikro frezelemede takım ömrü ve kalite kriterleri hakkında araştırma yapmışlardır. Çalışmanın amacı mikro freze takımlarını kullanarak yapılan deneylerde çıkan sonuç ile teorik olarak elde edilen sonuçları, takım ömrü ve yüzey kalitesi parametreleri bağlamında değerlendirmek olarak tanımlanmıştır. Takım aşınması kriterlerinin yüzey pürüzlülüğü üzerine etkileri ile birlikte kesme kuvvetlerinin takım aşınmasına olan etkileri de araştırılmıştır. Deneyler aynı çaptaki mikro freze uçları ile iki aşamada gerçekleştirilmiştir. Birinci aşamada, 130 m/dak kesme hızı ve 3 µm talaş derinliği kullanılarak gerçekleştirilmiştir. İkinci aşamada ise 240 m/dak kesme hızı ve 5 µm talaş derinliği kullanılmıştır. Deneyler sırasında oluşan kesme kuvvetleri zamana bağlı olarak kaydedilmiş ve grafik edilerek yorumlanmıştır. İş parçasında oluşan enine ve boyuna yüzey pürüzlülükleri de ölçülerek sonuçları değerlendirilmiştir (Şekil 2.2 ve Şekil 2.3). Araştırma sonucunda yüksek kesme hızlarında takım aşınmasının ve kesme kuvvetlerinin fazla olduğu, ancak bunun yanında boyuna yüzey pürüzlüğünün daha iyi durumda olduğu dile getirilmiştir (Rodriguez, Perez, Labarga and Vizan, 2008).



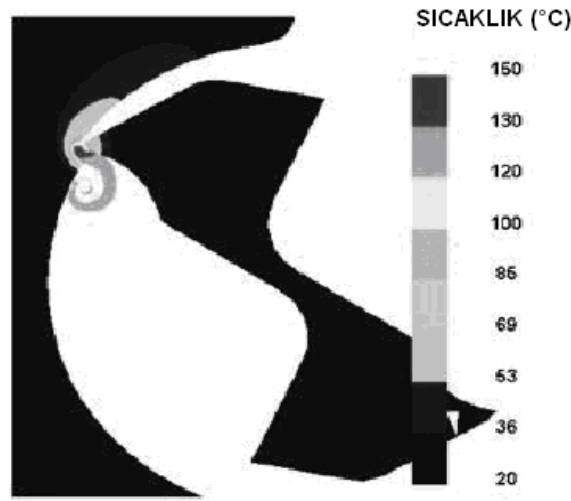
Şekil 2.1 Zamana bağlı olarak işleme yönüne paralel yüzey pürüzlülüğünün değişimi (Rodriguez, Perez, Labarga and Vizan, 2008).



Şekil 2.2 Zamana bağlı olarak işleme yönüne dik yüzey pürüzlülüğünün değişimi (Rodriguez, Perez, Labarga and Vizan, 2008).

Özel et al. araştırmalarını mikro frezeleme işlemlerinin modellenmesi ve simülasyonu üzerine yapmışlardır. Mikro üretim yöntemleri arasında en az maliyetli yöntemin mikro frezeleme olduğu üzerine vurgu yapılmış, ancak şu an istenmeyen çapak, aşırı takım aşınması ve ani takım kırılması gibi nedenlerden dolayı tam verimli kullanılmadığı

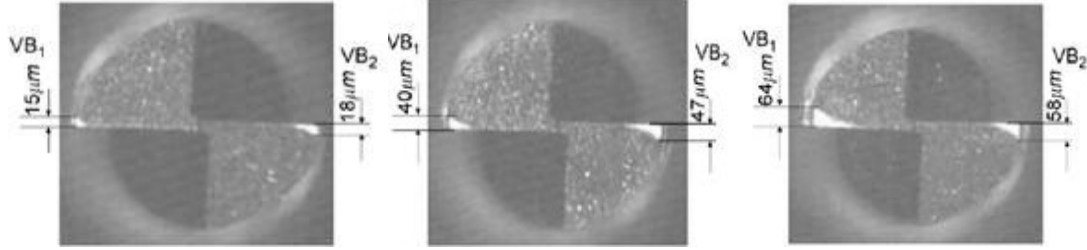
söylenmiştir. Yapılan deneylerde Alüminyum 2024-T6 ve AISI 4340 malzemelerini işlemek amacı ile 635 µm çaplı 2 ağızlı WC-Co freze takımı kullanılmıştır. Deneyler sırasında talaş oluşum açısı, diş başına ilerleme, takım kenar radyüsü, kesme hızı parametreleri dikkate alınarak kesme kuvvetlerindeki değişim araştırılmıştır. Yapılan nümerik çözümlerde talaş akışı, kesme kuvvetleri ve oluşan kesme sıcaklığı değerleri elde edilmiştir (Şekil 2.4). Çapa oranlanmış minimum talaş derinliğinin, Alüminyum malzemede %42~45, AISI 4340 çelikte ise %30~36 arasında olduğu saptanmıştır. (Özel, Liu and Dhanorker, 2007) .



Şekil 2.3 Mikro frezeleme işleminde kesme esnasında meydana gelen sıcaklığın dağılımı (Özel, Liu and Dhanorker, 2007).

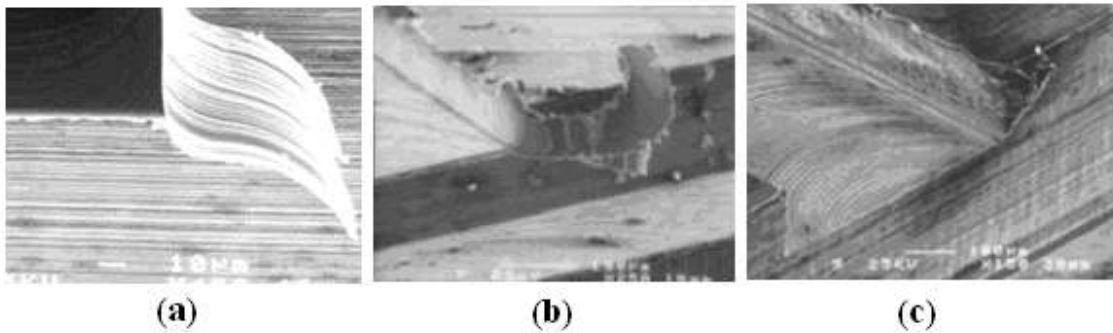
Zhu et al. araştırmalarını mikro frezelerdeki takım aşınmasını Hidden Markov Modeli (HMM) ile çoklu kategori de inceleme konusunda yapmışlardır. Araştırmada mikro frezelemekten ve onu geleneksel işlemlerden ayıran faktörlerden bahsedilmiş. Talaş akış hızı, titreşimler ve ölçekleme gibi problemler ile yüksek mil hızı, takım aşınması ve işleme özelliklerini sinyalle takip etme gibi zorluklar ortaya konmuştur. Bu kadar çok faktörün tek kategori yerine çoklu kategoriden izlenerek HMM ile incelenmesi gerektiğinin ispatı yapılmaya çalışılmıştır. Bu modelin kimler tarafından ve hangi modeller ile birlikte kullanıldığı üzerinde durulmuş. Akabinde bu modeli oluşturan elemanlar açıklanarak, diğer modellere göre daha avantajlı olduğu ifade edilmiştir. HMM algoritması ortaya konmuş ve parametrelerinden bahsedilmiştir. Bu parametreleri

doğrulamak amacı ile deneyler yapılmıştır. Deneylerde takım aşınmasının (Resim 2.1) zamana bağlı değişimi elde edilmiştir (Zhu, Wong and Hong, 2009).



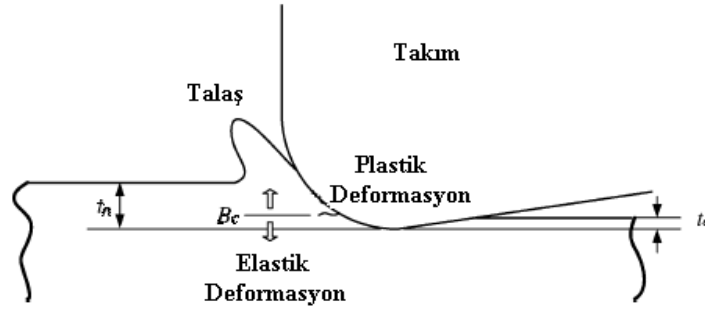
Resim 2.1 Bir mikro freze takımında meydana gelen aşınma (Takım çapı 800 µm, işleme zamanı 240 sn) ,(Zhu, Wong and Hong, 2009).

Lee et al. ise mikro frezelemede meydana gelen çapak oluşumlarını araştırmıştır. Çapağın istenmeme sebebi açıklanarak, normal frezeleme işlemlerinde çapak almanın kolay ve maliyetinin düşük olduğu söylenmiştir. Bu alanda, sadece Alüminyumun işleminde çapak oluşumu ile ilgili araştırma yapıldığı ve bu konunun mekanizmalarının anlaşılmadığı vurgulanmıştır. Çapak oluşumunu incelemek ve araştırmak amacı ile Alüminyum 6061-T6, Paslanmaz Çelik-304 ve Bakır-110 üzerinde deneyler yapılmıştır. Mori Seiki CNC Delik İşleme Merkezinde soğutma sıvısı kullanılarak yapılan deneylerde 635 µm, 254 µm ve 127 µm çapında 3 adet mikro freze takımı kullanılmıştır. Her kesici takım için 5 farklı derinlik ve 5 farklı ilerleme kullanılarak kombine edilmiştir. Çıkan sonuçlar giriş çapağı, üst çapak ve çıkış çapağı (Resim 2.2) olarak sınıflandırılmıştır (Lee, Esse and Dornfeld, 2001).



Resim 2.2 Çıkış çapakları, (a) Alüminyum, (b) Çelik, (c) Bakır (Lee, Esse and Dornfeld 2001).

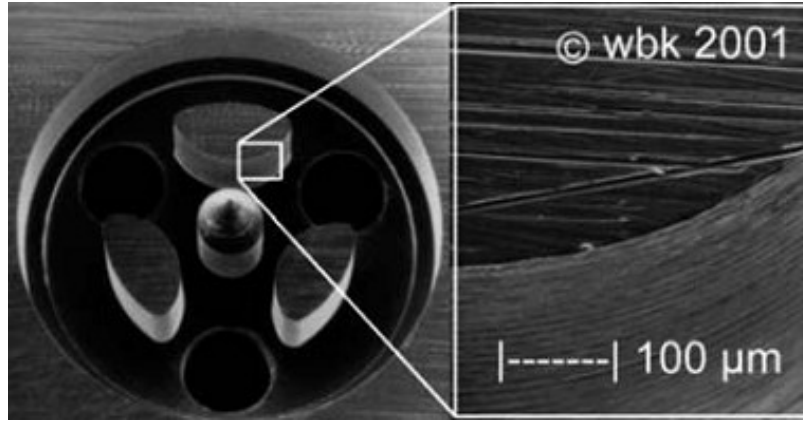
Son et al. mikro frezeleme de kesme derinliğinin sürtünme katsayısı ile ilgili ilişkilerini araştırmıştır. Çalışmanın amacı, mikro frezeleme yöntemini kullanarak daha kaliteli yüzeyler elde etmek için, kesme derinliği ile sürtünme katsayısı arasında bir model oluşturmak olarak belirlenmiştir. Amaca ulaşmak için öncelikli olarak, minimum talaş derinliği, minimum kesme derinliği kuvveti kullanılarak en uygun kesme modeli tasarlanarak, simüle edilmiş (Şekil 2.5) ve çıkan sonuçlar değerlendirilmiştir. Sonraki aşamada tasarlanan sonuçlardan hareketle deney seti kurulmuştur. Deneyden çıkan kesme kuvveti ve kesme derinliği sonuçları, simülasyon sonuçları ile karşılaştırılmış. Çıkan talaş tipleri ile oluşan kesme kuvvetleri karşılaştırılmış ve sonuçta çıkan yüzey kaliteleri ve kesme derinliği malzeme bazında değerlendirilmiştir. Minimum kesme derinliği, kesici kenar yarıçapı ve sürtünme katsayı arasında bağıntı kurulmuştur. Teorik olarak hesaplanan minimum kesme derinliği (0,09~0,12 mm) ile deneysel sonuçların birbirine eşit çıktığı görülmüştür (Son, Lim and Ahn, 2005).



Şekil 2.4 Kesici takım ile kesme işleminde talaş oluşumu (Son, Lim and Ahn, 2005).

Ducobu et al. mikro frezeleme de talaş oluşumu üzerine araştırma yapmışlardır. Mikro frezelemede minimum talaş derinliğini tahmin etmenin ana problemlerden biri olduğu tespit edilmiş ve bunun talaş derinliği, takım geometrisi gibi etkenlere göre güçlkle bulunduğu söylenmiştir. Minimum talaş derinliği, sayısal simülasyon ve sonlu elemanlar yöntemiyle ispatlanmaya çalışılmıştır. Nümerik modelleme için Abaqus programı ile kullanılmıştır. Modellemede işlenen malzeme Titanyum Alaşım 1 Ti6Al4V, freze ucu da WC olarak seçilmiştir. Araştırma sonucunda kesme derinliği kritik seviyesi 0,10 mm olarak tespit edilmiştir (Ducobu, Filippi and Lorphèvre, 2009).

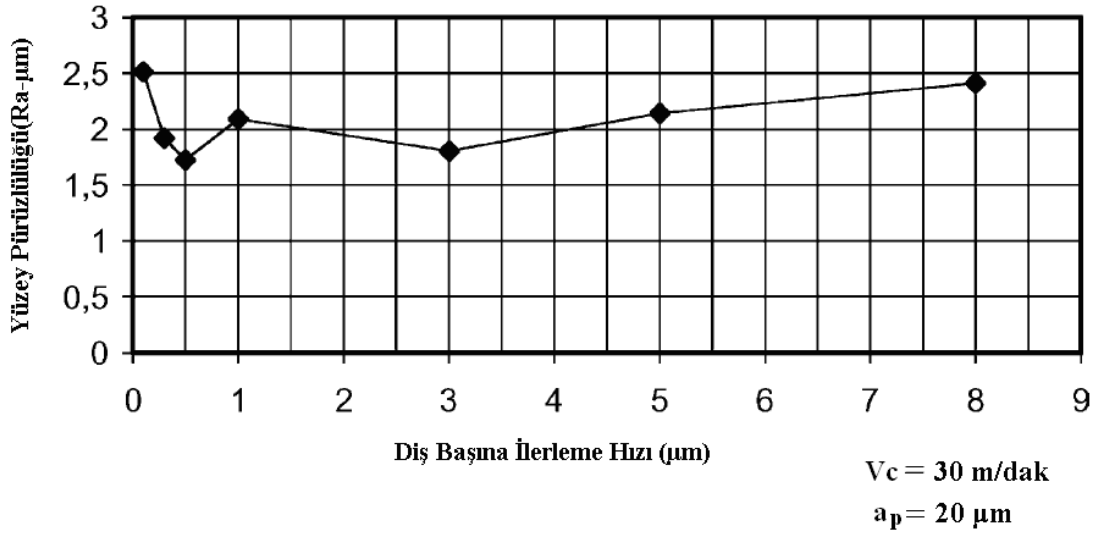
Schmidt and Tritschler tarafından yapılan çalışmada sert kalıp çeliklerinin işlenmesinde (Resim 2.3) mikro freze uçlarının yeterli ve ekonomik olup olmadıkları araştırılmıştır. Bu çelik malzemeleri işleyecek takımın, minimum yapı boyutunu, geometrik doğrusalığını ve aşınma sınır değerlerini saptamak gerektiği üzerinde durulmuştur. Bu amaçla 42 ve 56 HRC sertlikte ısıtılmış işlem görmüş takım çeliği malzemesi işlenerek bir dizi deneysel çalışma gerçekleştirmişlerdir. Sonraki aşamada teorik kesme kuvvetleri hesaplanmış ve her malzeme için ayrı ayrı ilerlemeye bağlı kesme kuvveti diyagramı, düzlemselliğe bağlı yüzey pürüzlüğü grafiği çıkartılmıştır. Sonuç olarak çeşitli sertlikte ayarlanmış çeliklerde 0,5 μm ve 1,6 μm yüzey pürüzlüğü elde edilmiştir. Bunun yanısıra mikro freze ile açılan kanallarda meydana gelen çapak oluşumu takip edilip verileri toplanmıştır (Resim 2.3). Çalışmada ayrıca iş kalıpları açısından yüzey kalitesi ve işleme zamanı üzerine olumlu sonuçlar alındığı belirtilmiştir (Schmidt and Tritschler, 2004).



Resim 2.3 Araba tekerleği modeli çelik kalıp boşluğu (52 HRC) ve çentikli kenar detayı (Schmidt and Tritschler, 2004).

Takács et al. mikro frezeleme ile metalik malzemelerin işlenmesi üzerine yaptıkları araştırmada imalat sektörünün önemli alanlarında minyatür parça üretiminin gerekli olduğunu vurgulamışlardır. Yapılan çalışmada metalik malzemelerin işlenmesi için en uygun parametrelerin bulunması ve geometrik yüzey kalitesinin en üst seviyeye çıkartılması amaçlanmıştır. Araştırma ve inceleme için geleneksel freze tezgâhlarından farklı olan 160.000 dv/dak iş mili hızına sahip ve 0,1 μm hassasiyetli işlem merkezi

imal edilmiştir. 150 μm , 300 μm , 400 μm ve 600 μm WC freze uçları ile Pirinç, Ck-45 Alaşımlı Çelik (Sertlik 32 HRC) malzemeler işlenerek bir takım deneyler gerçekleştirilmiştir. Deney sonucunda doğrusal yüzey pürüzlüğünün 2,5 μm seviyesinde, çapraz yüzey pürüzlüğünün ise 1,5-2 μm seviyesinde seyrettiği tespit edilmiştir (Şekil 2.6). En iyi sonuçlar temperlenmiş V-500 ve Ck45 çelikte elde edilirken kritik talaş derinliğinin 5–15 μm 'den fazla olmaması gerektiğini vurgulamışlardır (Takács, Verő and Mészáros, 2003).



Şekil 2.5 İlerleme hızına bağlı yüzey pürüzlülüğü değişimi (Takács, Verő and Mészáros, 2003).

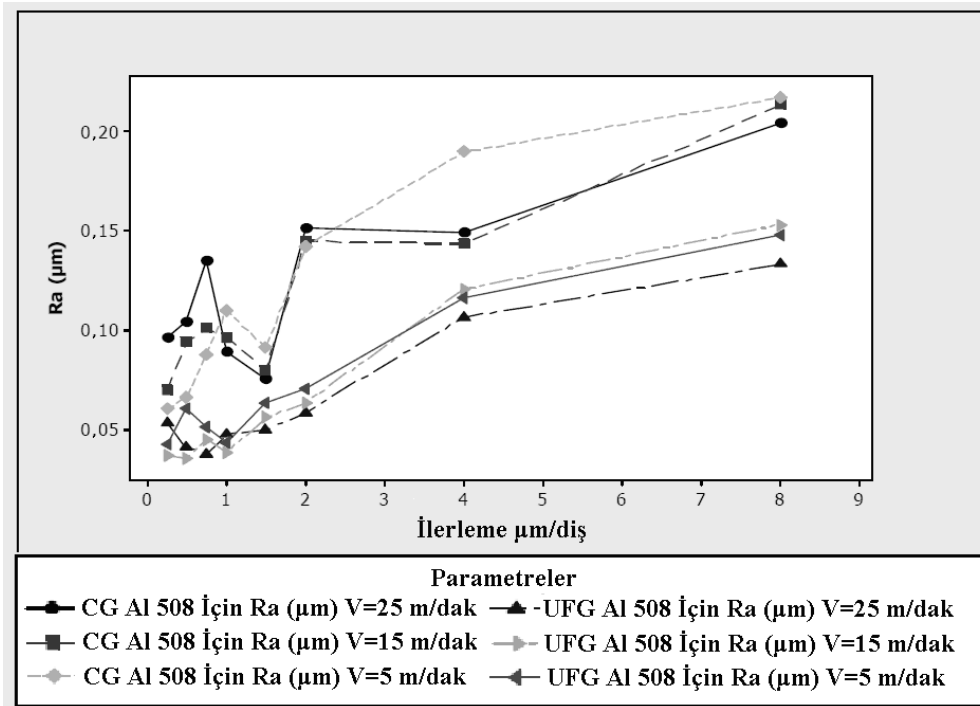
Bisacco et al. Mikro enjeksiyon kalıplarında kullanılan çeliklerin kesilebilirliği üzerinde bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Ancak kalıp malzemelerinin sert olması ve mikro frezelerinin kesme derinliğinin çok düşük değerlerde olmasının önemli bir handicap olduğu ifade edilmiştir. Mikro kalıplarda istenilen yüzey pürüzlülüğünü elde edebilmek amacıyla, küresel uçlu mikro frezelerle, düz uçlu mikro frezeler teorik olarak karşılaştırılmış. Teorik anlamda deneye referans oluşturması amacı ile uygun kesme parametreleri simule edilerek tasarlanmıştır. Tezgâhın rijitliğinin korunması için bulunduğu çalışma ortamı sıcaklığı, sabit 21°C derecede tutulmuştur. İş parçası malzemesi olarak 58 HRC sertliğine sahip paslanmaz çelik seçilmiştir. Frezeleme

işleminde iki ağızlı uç ile birlikte %5 emülsiyonlu kesme sıvısı kullanılmıştır. Deney sonunda, teorik sonuçlar ile deney sonuçlarının birbiriyle uyum içerisinde olduğu görülmüştür. Elektron mikroskobu vasıtası ile çekilen fotoğraflarda talaş artıklarının yüzey üzerinde iz bıraktığı fakat bunun yüksek öneme sahip olmadığı belirtilmiştir (Bissacco, Hansen and Chiffre, 2006).

Wang et al. mikro frezeleme işleminde, Taguchi deney tasarımı ve yapay sinir ağlarını kullanarak yüzey pürüzlülüğünün tahmin edilmesine yönelik bir araştırma yapmışlardır. Araştırmada ilerleme hızı, kesme derinliği ve yüzey pürüzlülük değerleri analiz edilerek, en uygun parametrelerin bulunması amaçlanmıştır. Yüzey pürüzlülüğü parametrelerin kombinasyonu ile çıkan sonuçların değerlendirilmesinin zor olduğu ve bunu yapmak için nöron network modelinin kullanılması gerektiği savunulmuştur. Deney tasarlanırken, Taguchi yaklaşımı referans alınarak minimum deneme sayısı ile bilgi edinme amaçlanmıştır. 400 µm çaplı 4 ağızlı mikro freze ucu ile Alüminyum 6061-T6 malzeme üzerine 6 mm boyunda 25 adet kanal açılarak deney yapılmıştır. Parametreler tezgâh limitlerine göre düzenlenip çıkan sonuçlar sinir ağları modeli ile yorumlanmıştır (Wang, Gong, Shi and Abba, 2009).

Liu et al. mikro frezeleme konusunda yapılmış olan araştırmaları irdelemişlerdir. Araştırmanın amacı, mikro işleme konusunda genel bir değerlendirme mekanizması oluşturarak verimli çalışmaların çıkmasını sağlamak olarak tanımlanmıştır. Literatür taraması yapılarak mikro frezelemeye etki eden faktörlerden takımın boyut etkisi, minimum talaş derinliği, yüzey pürüzlülüğü, çapak oluşumu, kesme kuvvetleri, kesme sıcaklığı, takım ömrü, mikro yapıdaki değişimler ve modelleme gibi konularda yapılan çalışmalar değerlendirilmiştir. Çalışmada mikro frezelemenin termal yönden incelenmediği ve bu konuda daha fazla araştırmaya gereksinim olduğu ifade edilmiştir. Mikro frezelerdeki istikrar ve titreşim sorunlarına derinlemesine bir araştırma yapılmadığı üzerine dikkat çekilmiştir. Malzeme yelpazesi genişletilerek, minimum talaş derinliği üzerinde gelişmiş yöntemler bulunması gerektiği tespit edilmiş. Ayrıca, üretim ve yüzey karakterlerini etkileyen olaylar üzerine daha fazla araştırma yapılması gerektiği ifade edilmiştir (Liu, DeVor, Kapoor and Ehmann, 2004).

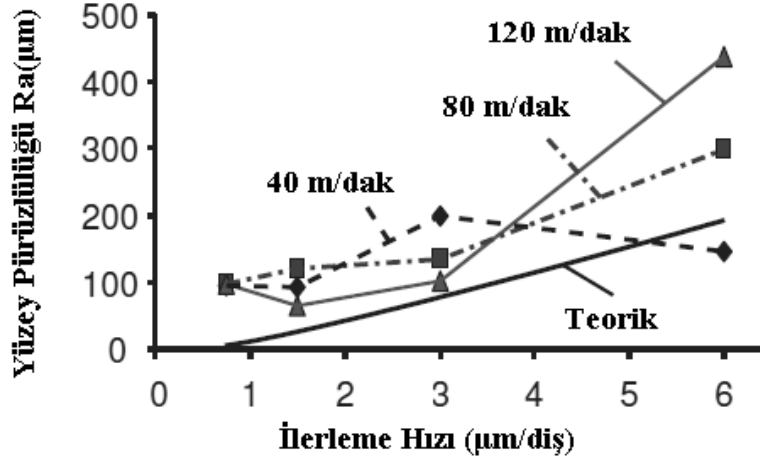
Pham et al. mikro frezleme işlemlerinde yüzey pürüzlülüğünü etkileyen faktörler üzerine deneysel ve istatistiksel bir çalışma yapmışlardır. Yapılan deneyde farklı mikro yapıya sahip Al 508 malzeme, sabit kesme (10 μm) derinliğinde işlenmiştir. Sonuçta mikro yapısı daha homojen olan malzemelerde yüzey pürüzlülüğünün daha iyi olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca diş başına ilerlemenin kesme hızından daha önemli bir faktör olduğu bildirilmiştir. Yapılan deneyde Al 508 malzemenin, ince dokulu [Ultra fine grained (UFG)] ve kaba dokulu [coarse grained (CG)] olmak üzere iki çeşidi incelenmiştir. Deneylerde kesme derinliği sabit 10 mikron alınarak üç farklı kesme hızı ve sekiz farklı ilerleme kullanılmıştır. Deneyler iki malzemeyede tam faktöriyel uygulanarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 2.7). Elde edilen bulgular daha önce çalışması yapılan CU.99.9E malzemesi üzerinde yapılan deneyde elde edilen bulgular ile karşılaştırılmıştır. Sonuçta, kesme hızından ziyade diş başına ilerlemenin yüzey pürüzlülüğünü daha çok etkilediği görülmüştür. Ayrıca kaba dokulu malzemede yüzey pürüzlülüğünün %30~50 daha az çıktığı saptanmıştır (Pham, Elkaseer, Popov, Dimov, Olejnik and Rosochowski, 2008).



Şekil 2.6 CG ve UFG Al 508 için farklı kesme koşullarında elde edilen yüzey pürüzlülükleri (Pham, Elkaseer, Popov, Dimov, Olejnik and Rosochowski, 2008).

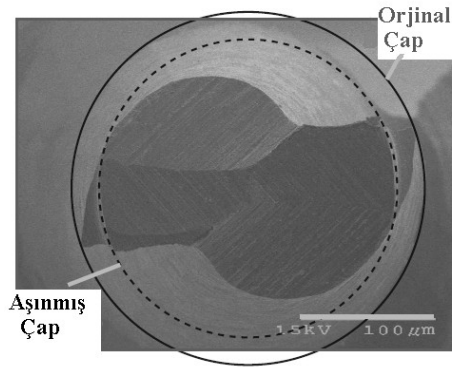
Uhlman et al. sinterlenmiş Tungsten-Bakır (WCu) malzeme üzerinde mikro frezelemenin etkilerini araştırmışlardır. EDM (Electro Discharge Machining) için kullanılan en uygun malzeme WCu kompozit malzemesi olarak gösterilmiştir. Araştırmanın amacı, imalat tekniklerinin uygulanabilirliğinin az olduğu bu malzeme türü için en uygun WCu matrisini bulmak ve bu malzeme için en uygun kesme parametrelerini tespit etmek olarak gösterilmiştir. Araştırmada freze ucu üretim teknolojilerini değerlendirmek amacı ile 0,5 mm çapında 2 ağızlı karbür uç ve 0,5 mm çapında TiAlN kaplamalı karbür uç kullanılmıştır. WCu malzeme üç farklı mikro yapıda hazırlanmış, deney sonunda mikro yapılarına göre yüzey pürüzlülüğü ve takım üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Araştırma sonucunda, WCu malzeme işlenirken dikkate alınması gerekenler sıralanmıştır. Düşük ilerleme değerlerinin, ısı ve malzemenin plastik deformasyonu sonucu aşınmayı meydana getirdiği SEM (Scanning Electron Microscopy) fotoğraflarıyla gösterilmiştir. Ayrıca yüzey pürüzlülüğünün mikro sertlik ve homojen yapıdan dolayı daha iyi çıktığı tespit edilmiştir (Uhlmann, Piltz and Schauer 2005).

Ozdoğanlar ve Filiz, iletkenliği yüksek Bakır 101 [Oxygen Free High Conductive Copper (OFHC)], malzemesini mikro frezeleme ile işlemede oluşan kesme kuvvetlerini, yüzey pürüzlülüğünü, aşınmayı ve çapak oluşumunu incelemek üzere deneysel bir araştırma yapmışlardır. WC freze ucu, SEM kullanılarak fotoğraflanmış ve ortalama tane boyutu 0,4 μm ve 0,7 μm arasında tespit edilmiştir. Mikro yapıda arada kalan küçük Kobalt taneciklerinin sünek kırılmaya neden olduğu söylenmiştir. Yapılan deney 254 μm çaplı kesici uç ile farklı parametreler kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Yüzey pürüzlülüğü değerlerinin teorik hesaplara göre fazla olduğu görülmüştür. Ayrıca yüksek kesme hızı ve düşük ilerlemede en iyi yüzey kalitesi elde edilmiştir (Şekil 2.8), (Ozdoğanlar ve Filiz, 2006).



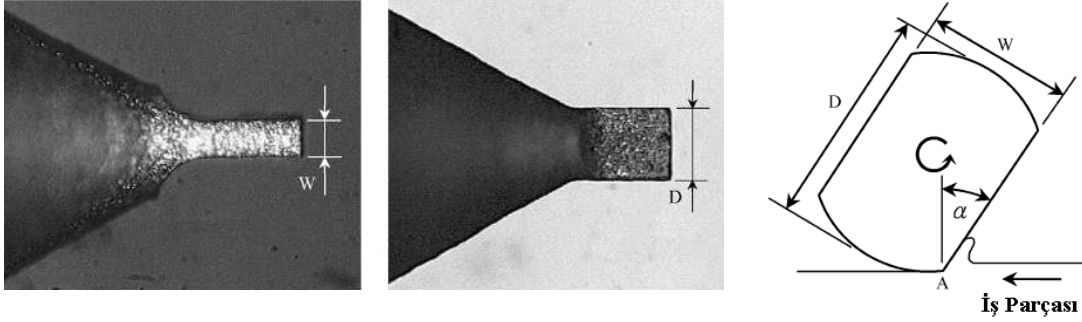
Şekil 2.7 Bakır 101 malzemesi üzerine açılan kanalın yüzey pürüzlülük değerlerinin ilerlemeye bağlı değişimi (Ozdoğanlar ve Filiz, 2006).

Freze ucunda deney sonunda %20 çap azalması olduğu saptanmıştır (Resim 2.4). En büyük aşınmanın en düşük ilerleme ve kesme hızında olduğu tespit edilmiştir. Sonuçta konvansiyonel frezelemedeki deneyimin aksine, en küçük aşınma en yüksek kesme hızı (120 m/dk) ve ilerleme hızında (6 µm/diş) olduğu gözlemlenmiştir (Ozdoğanlar, Filiz, 2006).



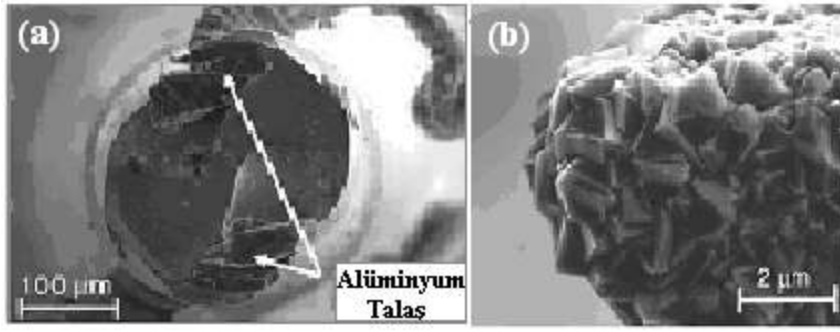
Resim 2.4 Talaş kaldırmadan sonra mikro takımda meydana gelen çap azalması (Ozdoğanlar ve Filiz, 2006).

Gwo et al. EDM ile WC freze ucu imal ederek mikro frezelemede çapak oluşumunu incelemiştir. Özel olarak tasarlanmış mikro freze ucu, EDM kullanılarak imal edilmiştir. Diğer üretim yöntemlerine göre çok ucuza imal edilmiş ve farklı geometrik yapısı ile kesme işlemini gerçekleştirdiği görülmüştür (Şekil 2.9). Deneyde Al 6061-T6 malzeme işlenerek çapak oluşumu gözlemlenmiştir. Buna göre 4 tip çapak oluşmuştur. Bunlar sırası ile birincil çapak, iğne benzeri çapak, tüylü çapak ve küçük çapak olarak sınıflandırılmıştır (Gwo, Ying, Jyun and Jian, 2007).

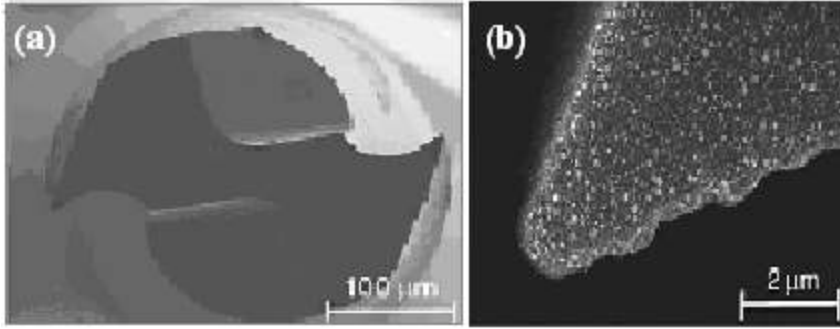


Şekil 2.8 EDM yöntemi ile imal edilen mikro kesici takımı (Gwo, Ying, Jyun and Jian, 2007).

Heaney et al. elmas kaplamalı mikro freze ucun, Alüminyum malzemede kuru işleme şartlarında performansını test etmek amacı ile deneysel bir araştırma yapmışlardır, 300 mikron çapında WC ucu, yeni bir yaklaşımla 2 μ m kalınlığında elmas kaplama yapılmıştır. Deney sırasında Al 6061-T6 işlenerek, kaplamasız takım ile kaplamalı takım arasındaki, kesme kuvveti, aşınma, yüzey pürüzlülüğü ve çapak oluşumu parametrelerinin farklılığı incelenmiştir. Testler sonucunda 30~300 nm ince taneli elmas WC ucun, kesme kuvvetlerini %75~%90 azalttığı gözlenmiştir. Kaplanmış takımın aşınma ve kırılma direncinde büyük farklar olduğu ve Alüminyum malzemenin çok az miktarda sıvanma yaptığı gözlemlenmiştir (Resim 2.6-b). Ancak kaplanmamış takımda büyük miktarda sıvanma olduğu görülmektedir (Resim 2.5-a). Ayrıca yüzeyde çok az şekilde çapak oluşumu gerçekleşmiştir (Heaney, Sumant, Torres, Carpick and Pfefferkorn, 2008).



Resim 2.5 Kaplamasız mikro frezede, (a) İşleme sonrasında kesiciye yapışan Alüminyum talaşları, (b) Kaplamasız freze ucu mikro yapısı (Heaney, Sumant, Torres, Carpick and Pfefferkorn, 2008).

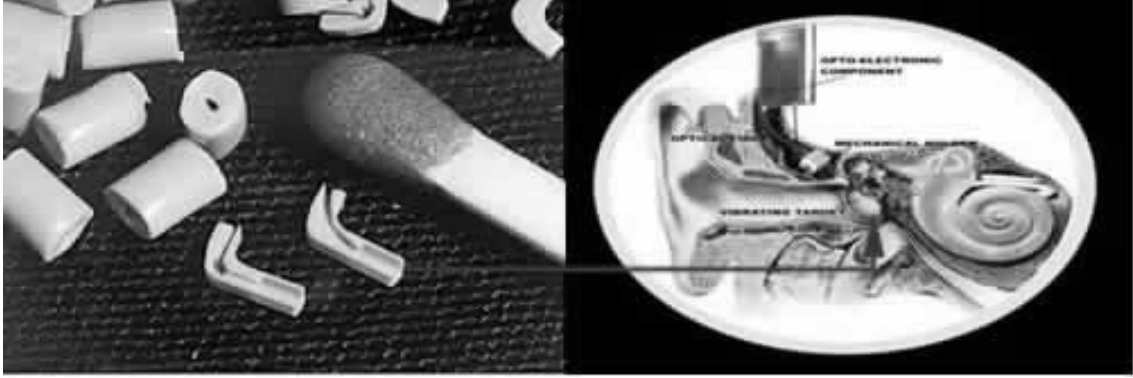


Resim 2.6 Elmas kaplamalı mikro frezede, (a) İşleme sonrası kesici ucu, (b) Freze ucu mikro yapısı (Heaney, Sumant, Torres, Carpick and Pfefferkorn, 2008).

2.2. Genel Mikro Üretim Teknikleri

Mikro-elektro-mekanik sistemlerin karakteristik boyutu çoğunlukla birkaç mikrometreden birkaç santimetreye kadar değişebilir. Bir mekanik sistemi mikro ölçekli olarak küçültmenin birçok yararı vardır. Öncelikle böyle bir sistemde, hacimle ilgili kuvvetler (ağırlık/atalet) önemini yitirir. Bunun doğal sonucuysa, çok hızlı mekanik sistemlerin mikro ölçekli dünyada gerçekleştirilebileceğidir. Böylece anlık hareket ettirilip durdurulabilen mekanizmalardan; çok büyük ivmeli hareketlere dayanabilecek duyuculara kadar, birçok sistemi mikro ölçekli dünyada hayata geçirmek mümkün olur. Ayrıca mikro mekanik sistemler büyük ölçekli makine sistemlerine göre daha az yer

kaplayıp, daha az güç harcarlar. Teknik kaynaklarında çok sayıda mikro-üretim tekniği bulunmaktadır. Bu teknikler kullanılarak, boyutları birkaç mikrometreden birkaç mm'ye kadar değişen türlü amaçlı mikro cihazlar üretilebilmektedir. Örnek olarak Resim 2.7'da gösterilen kulak içi biyomedikal ürün gösterilebilir. Bu tekniklerden önemlileri şöyle sıralayabiliriz (Kaplan ve Dölen 2003).



Resim 2.7 Biyomedikal sektöründe kullanılan mikro parçalar (Kaplan ve Dölen 2003).

2.2.1. Yüzey Mikro işleme

Bu teknikte, nispeten alçak yüksekliğe (birkaç mikron) sahip mekanik sistemler, çeşitli geçici ve esas malzeme katmanları şekillendirilerek, bir silisyum pulun yüzeyinde oluşturulur. Mikro yüzey işleme, foto litografi tekniğine dayalı bir üretim şeklidir (İnt. Kyn.2) .

Şekil 2.10 bu teknikte kullanılan önemli işlem adımları göstermektedir. Öncelikle yabancı maddelerden arındırılmış silisyum plakanın yüzeyi ince bir yalıtım katmanıyla (genellikle Si_3N_4) kaplanır (Şekil 2.10-1). Ardından onun üzerinde ince bir ana malzeme (çoğunlukla çok kristalli silisyum-poli silisyum) katmanı oluşturma aşamasına geçilir (Şekil 2.10-2). Bir sonraki adım, foto direnç (örneğin foto polimer) malzemesiyle en son yüzeyin kaplanmasıdır (Şekil 2.10-3). Daha sonra foto direnç katmanı bir maskeden geçirilen (optik, X ışını, mor ötesi vb.) bir ışıma ya tâbi tutulur (Şekil 2.10-4). Burada söz konusu olan maske yüzeyde oluşturulmak istenen şekli içerir ve çoğunlukla cam üzerine krom kaplanarak elde edilir. Işıma altında kalmış foto

direnç malzemesi kimyasal olarak değişime uğrar (Şekil 2.10–5). Bu işlemi takiben, plaka (çoğunlukla alkol temelli) bir kimyasal çözelti içinde banyo edilir. Bu kimyasal banyo sırasında değişime uğramış foto direnç malzemesi erir ve böylece şekli içeren bir foto direnç malzemesi geriye kalır (Şekil 2.10–6). Maskedeki şekil foto direnç katmanına aktarıldıktan sonra, olası kirlenmeye karşı (çoğunlukla plazma yardımıyla) arındırılır; son bir fırınlamanın ardından; başka kimyasal banyo (asit temelli) ile açıkta kalan esas malzeme katmanını kazınır (Şekil 2.10–7). Bu işlemin ardından, kalan foto direnç malzemesi uygun tekniklerle alınır (Şekil 2.10–8), (İnt. Kyn.2).



Şekil 2.9 Yüzey mikro işleme tekniği işlem sırası (İnt. Kyn.2).

Silisyum yüzey mikro işleme tekniklerinin en çekici yanı, mikro elektronik endüstrisinde hali hazırda kullanılmakta olan donanım ve işlemlerden faydalanmasıdır. Bu tekniğin en önemli sakıncalarından biri, mikro yapıların kalınlıklarının sadece birkaç mikronla sınırlı olmasıdır (İnt. Kyn.2). Resim 2.8’de gösterilen elektro statik motor bu teknikle işlenmiştir.



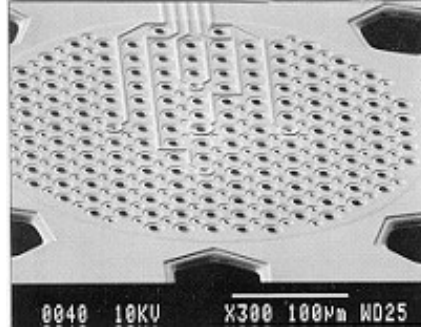
Resim 2.8 Silisyum yüzey mikro-işleme tekniğiyle üretilmiş elektro statik mikro motor sistemi (İnt. Kyn.1).

2.2.2. Gövde Mikro İşleme

Bu işleme tekniğinde, mikro mekanik cihazlar silisyum kristalin üzerinde nispeten derin bir aşındırma yapılarak, çoğunlukla kanallar, yarıklar, piramitler, çeşitli şekillerdeki çukurlar oluşturulur. Kullanılan aşındırıcı ortamın özelliklerine bağlı olarak, çeşitli gövde mikro işleme yöntemleri geliştirilmiştir (Kovacs, Maluf and Petersen, 1998).

Çoğunlukla asit temelli sıvı kimyasal maddeler kullanılır. Fotolitografik yöntemlerle yüzeyi maskelenmiş silisyum plaka, asit temelli kimyasalları içeren banyoya daldırılarak bekletilir. Kullanılan kazıyıcı maddenin özelliklerine bağlı olarak açıkta kalan malzeme farklı biçimlerde kazınır. Gövde mikro işleme tekniği çoğunlukla silisyum pul birleştirme tekniklerine ihtiyaç gösterir. Böylelikle, bu teknikle üretilmiş birçok pul birleştirilerek, değişik ölçülerde ve karmaşıklıkta mikro mekanik yapılar meydana getirilir. Örneğin Resim 2.9’da çözülmüş pul tekniğiyle elde edilen elek tipi elektrot görülmektedir. Birleştirme tekniği olarak, anodik bağlama ve silisyum kaynağıyla bağlama oldukça yaygın olarak kullanılır. Aslında silisyum plaka birleştirme teknikleri çok katlı mikro yapıları üretilmesi yanında, yalıtım/salmastra, montaj ve paketlenme gibi işlemlere de uyarlanmıştır. Gövde mikro işleme tekniğine örnek olarak

vücut içindeki elektrik akımlarını ölçmek için kullanılan eleksi elektrotu verilebilir (Shimbo, Furukawa, Fukuda and Tanzawa 1986).

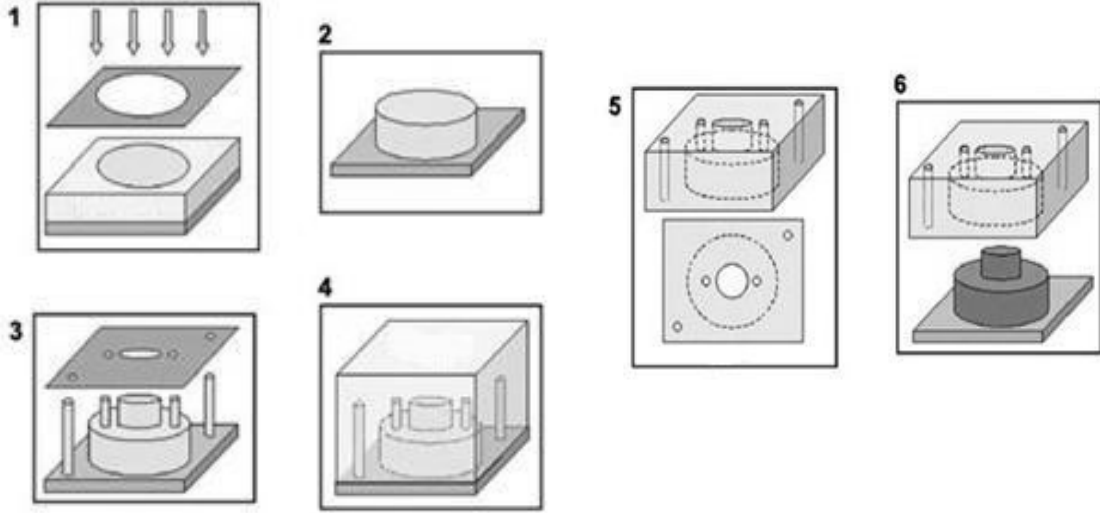


Resim 2.9 Çözölmüş pul tekniğiyle elde edilen elek tipi elektrot (Akın, Najafi, Smoke and Bradley, 1994).

2.2.3. Geliştirilmiş LIGA İşlemi

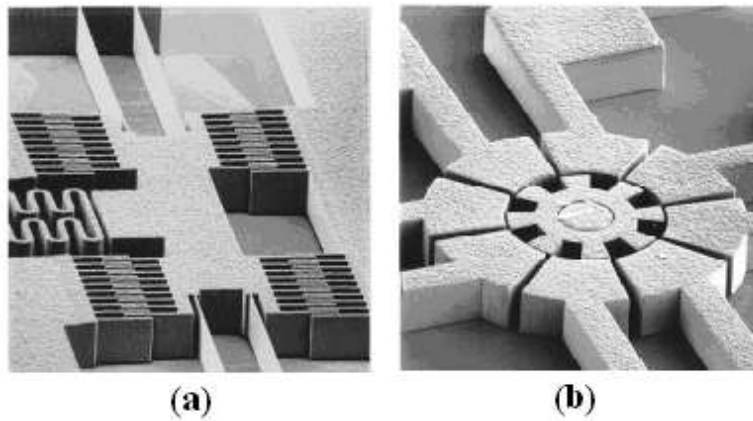
Proses ışık düzenleyen epoksi tabakası cam veya silikon bir temelle başlar. Daha sonra ince bir krom tabaka epoksinin üzerine yerleştirilir. Ultraviyole ışınları bu tabakaya çarparak alt kısımda 0,5 mm derinlikte bulunan epoksiyi sertleştirir. Bu krom tabaka değiştirilip bir diğer 0,5 mm derinliğe işlem uygulanabilir. Toplam yükseklik 1,5 mm' ye kadar çıkartılabilir. Bu sertleştirilmiş epoksi Nikel veya Nikel alaşımıyla elektro plate yöntemine tabi tutulur. Yani kaplanır. Daha sonra epoksi eriyip kaybolur ve sonuç olarak EDM veya frezelemeden daha iyi bir yüzey kalitesi elde edilir. (İnt. Kyn.2)

Şekil 2.11'de LIGA tekniği işlem sırası gösterilmiştir. Seçici epoksi reçine maske boyunca Ultraviyole ışınları yollar (Şekil 2.11-1). Epoksi, asitle yakılarak yok edilir (Şekil 2.11-2). Yeni gelen maske geçici ürünü oluşturur (Şekil 2.11-3). Metal, elektro form yöntemi ile epoksinin üzerine yapıştırılarak kalıp çukuru oluşturulur (Şekil 2.11-4). Kalıp çukurunun yüksekliği doğru ayarlanıp kalıp çukurundaki epoksi eritilerek kalıp çukurunu terk etmesi sağlanır (Şekil 2.11-5). Kalıplamaya hazır hale getirilmiştir. Basılacak malzeme ile doldurulup kontrolü yapılır (Şekil 2.11-6), (İnt. Kyn.2).



Şekil 2.10 Geliştirilmiş LIGA tekniği işlem sırası (İnt. Kyn.2).

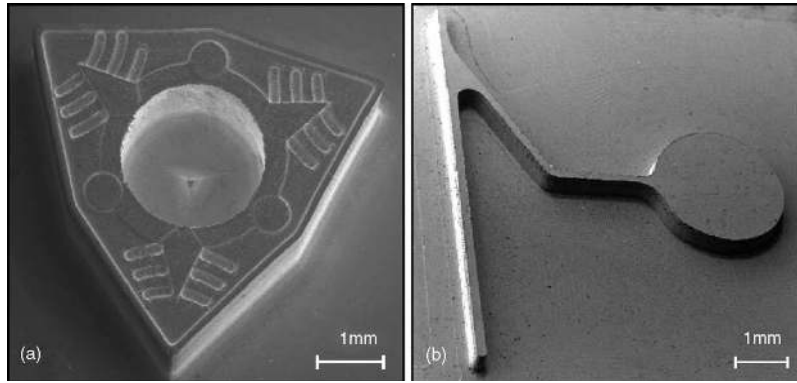
Bu teknolojinin bazı sınırlamaları vardır. Öncelikle, bu ilk krom tabakayı oluşturmak çok masraflıdır, Ancak bu tabaka çok değişik kalıpların oluşturulmasında kullanılabilir. İkinci olarak, LIGA kalıbı, X ve Y eksenlerinde istenilen yönde şekillendirebilir ancak dikey eksen ışık kaynağına paralel olmalıdır. Sonuç olarak 3 boyutlu, metal ve polimerik malzemeleri birleştiren bir mikro kalıplama sistemi ortaya çıkmıştır (İnt. Kyn.2). Resim 2.10’da geliştirilmiş LIGA tekniği ile elde edilmiş elektro statik tarak sistemi ve mikro motor görülmektedir.



Resim 2.10 Geliştirilmiş LIGA tekniğiyle üretilmiş mikro parçalar, (a) Elektro statik tarak sistemi ve (b) Mikro motor (Guckel,1997).

2.2.4. Elektro Erozyonla Mikro işleme

Toshiba Üretim Mühendisliği Araştırma Laboratuvarları'nda geliştirilen bu teknikte, 10 mikron çapındaki bir elektrot teli yardımıyla iletken olan herhangi bir malzeme EDM yoluyla çok hassas olarak şekillendirilebilmektedir. Mikro üretim için geliştirilen makine, standart takım tezgâhı araç ve gerecini kullandığı gibi; atölye üretim teknikleriyle de tamamen uyumludur. Ancak, diğer üretim tekniklerinin aksine; her parça tek tek üretildiğinden; yöntem şu an ki konumu itibariyle çoklu üretime elverişli değildir. Paralel elektrotlar yardımıyla seri üretim konusunda araştırmaların devam ettiği bildirilmektedir (Kinoshita, Veda, Murai and Hayashi, 1993). Resim 2.11'de Uhlmann et al. Yaptıkları çalışmada elde ettikleri dalma erezyon elektrotları görülmektedir.



Resim 2.11 Kompozit WCu dalma erezyon elektrotları (Uhlmann, Piltz and Schauer, 2005).

2.2.5 Lazerle Mikro İşleme

Bu teknikte, silisyum pul C_2 gibi bir buhar ortamına konur. Lazer ışını, kazıma tepkimesini hızlandırmak için kullanılır. Lazer ışınına maruz bırakılan bölgede ortaya çıkan yerel ısınma, tepkimenin hızını önemli ölçüde bir ölçüde artırır. Bunun yanında, eğer lazer için doğru bir dalga boyu seçilmişse (örneğin, C_2 için 500 nm) fotoliz yoluyla lazerle temas eden gazda (C_2 gibi) serbest radikaller ortaya çıkar ve SiCl_4 gibi kolayca buharlaşan silisyum bileşikler meydana getirir. Bu üretim tekniğiyle, delikler, kanallar, karmaşık yapı ve genel boyutları 1 mm altındaki mikro yapılar üretilir (Bloomstein and Ehrlich, 1991).

2.3. Mikro Frezeleme

Tüketiciler her zamankinden daha küçük ve daha akıllı ürünler talep etmektedirler. Cep telefonları, dizüstü bilgisayarlar, elektronik cihazlar ve mekanik motorlar gibi küçük modülleri olan ürünler daha ince ve hassas hale gelmektedir. Bazı küçük cihazlar ise büyük makineler içinde gizlenmektedirler. Örneğin BMW marka otomobillerin son modellerinde koltuk tasarımında 30 adet step motor bulunmaktadır. Yeni fren sistemleri ve yakıt enjektörleri de bu sınıfa örnek gösterilebilir (İnt. Kyn.5). Ayrıca havacılık, biyomedikal, optik cihazlar ve elektronik ambalaj sanayisinde hızla mikro frezelemeye ihtiyaç duyulmaktadır. Çok geniş malzeme yelpazesi ve üç boyutlu işleme kabiliyeti nedeni ile tercih sırasında üst seviyelere yükselmektedir 100 μm –10 mm meso ölçek, 0,1 μm –100 μm arası mikro ölçek olarak tanımlanmaktadır. Mikro frezeleme bu ölçekler arasında bulunan parçaların işlendiği alanı kapsamaktadır. Mikro kesme işlemi konvansiyonel kesme işlemi ile büyük benzerlik göstermektedir. İş parçasının yüzeyinden mikro takımlar ile mekanik olarak talaş kaldırılır. Mikro frezelemeyi anlamak için öncelikli olarak geleneksel frezeleme ile arasındaki farkları ortaya koymak gerekmektedir (Dhanorker and Özel, 2006).

- Mikro frezelemede kesici yarıçapı/talaş kaldırma oranı yüzdesi geleneksel yönetime göre daha yüksektir.
- Geleneksel frezelemeye göre hassasiyet μm derecesindedir.
- Geleneksel frezelemeye göre aşınma parametreleri farklıdır. Öngörülmeven bir şekilde kesme kuvvetlerine bağlı olarak aşınma gerçekleşebilir.
- Mikro frezelemede talaş kaldırma minimum talaş derinliğine bağlıdır. Geleneksel yöntemde her zaman talaş kaldırılabilir.
- Mikro frezelemede kesici uç deplasmanı geleneksel frezelemeye göre çok fazla bir şekilde talaş oluşumunu, yüzey kalitesini ve doğruluğu etkiler.
- Talaş oluşumunun kesici kenar boyutuna göre fazla olması sürtünme kuvvetini artırır (Dhanorker and Özel, 2006).

2.3.1. Kullanılan Mikro Freze Tezgâhları ve Özellikleri

İmalat sanayisinde iş parçası boyutlarının küçülerek minyatürleşmeye doğru bir eğilim sergilediği görülmektedir. Dolayısı ile mikro kesicilerin kullanımı da yaygın hale gelmektedir. Ancak düşük maliyetli ve verimli bir ekipman kullanımı için standart işleme uygulamalarının dışına çıkmak gerekmektedir. Mevcut konvansiyonel CNC ekipmanları ile küçük çaplı mikro freze uçlarının gerek duyduğu parametreleri sağlayamamaktadır (İnt. Kyn.7). Mikro frezeleme için bu sınırların ötesine geçmek gerekmektedir. Geleneksel tezgâhlardan daha fazla olacak şekilde makineyi oluşturan parçalar arasında sıkı kalite ilişkisi olmak zorundadır (İnt. Kyn.5). Konvansiyonel freze benzemesine rağmen, ebatlardaki önemli küçülme (yaklaşık olarak 1/40) hiç karşılaşılmamış durumların ortaya çıkmasına neden olmuştur. Bu ölçeğin küçülmesi mikro frezenin bazı parametrelerinde de keskin değişikliklere neden olmuştur. Örnek olarak diş başına 10 µm'den daha az ilerleme, 1–20 µm arası kesme derinliği, 30.000 dev/dak'dan fazla iş mili devri ve 0,25 mm'den daha küçük takım çapı gösterilebilir. Bu yüzden frezelerin kendisi, bu uygulamalar için yüksek hassasiyet gereksinimleri (0,1 µm civarında) göz önüne alınarak tasarlanmalıdır (Lacalle and Lamikiz, 2009).

Konstrüksiyon ve geometri makinenin genel performansı üzerinde büyük rol oynamaktadır. Sönümleme, rijitlik, doğruluk, termal kararlılık, iş hacmi ve operatör kullanım kolaylığı mikro freze tezgâh gövdelerini yakından ilgilendiren parametrelerdir. En çok kullanılan iki dikey mikro freze türü olarak Köprü tipi ve C tipi (Resim 2.12) tasarımlar gösterilebilir (İnt. Kyn.5).



a



b

Resim 2.12 Mikro freze tasarımları (a) Köprü tipi CNC, (b) C tipi CNC (İnt. Kyn.8).

İki tür tasarımın kendilerine göre eksi ve artı yönleri mevcuttur. Dinamik dayanıklılık doğruluğu etkileyen ana faktörlerdendir. C tipi tezgâhlar Köprü tipi tezgâhlara göre daha fazla dinamik dayanıklılığa sahiptirler. Köprü tipi tezgâhlarda X ve Z eksenlerle aynı konsolda birlikte hareket ettiklerinden dolayı dinamik dayanımları düşmektedir. Ancak daha geniş malzeme işleme kapasitesine sahiptir (İnt. Kyn.5).

Okazaki et al. maliyetleri azaltıp, esnekliği artırmak makine takımlarının minyatürize edilmesinde temel motivasyon kaynağı olduğunu söylemiştir. Bununla birlikte mikro makine takımlarındaki doğruluk (hassasiyet) henüz konvansiyonel makineler ile aynı seviyede olmadığını, bunun nedenin ise imalattaki yeterli rijitliğin, yerden kaynaklanan vibrasyonun ve hassasiyetin olmaması olarak göstermiştir (Okazaki, Mishima and Ashida, 2004).

Mikro freze tezgâhlarındaki diğer önemli özelliğin oluşan titreşimleri emerek dışarıya uzaklaştırması olmalıdır. Geleneksel tezgâhlardaki döküm ve çelik konstrüksiyon tek başına mikro freze tezgâhları için yeterli değildir. Çevresel malzeme olarak polimer beton kullanılmak zorundadır. Polimer beton malzemeli döküm, çelikten 10 kat daha fazla titreşim emilimi yapmaktadır. Dinamik ve statik dayanımı daha üst seviyelere çıkmaktadır (İnt. Kyn.5). Resim 2.13'te piyasa rekabet şartlarına göre üretilmiş olan mikro freze tezgâhları gösterilmektedir.



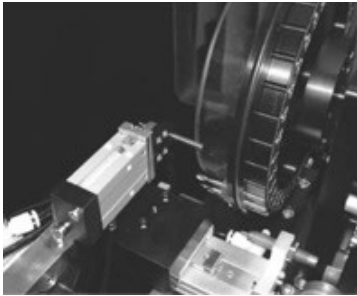
Resim 2.13 Ticari kulvarda kullanılan mikro freze tezgâhları (İnt. Kyn.4)

Geleneksel CNC tezgâhlarda kesici çaplarının büyük olmasından dolayı oluşan kesme kuvvetleri de büyüktür. Bu nedenle düşük devirlerde çalışılan ortamlarda yüksek torka ihtiyaç vardır. Mikro frezelemede ise daha az kesme kuvveti gerekirken, daha yüksek iş mili devrine ihtiyaç duyulmaktadır. Takım boyutuna göre rulmanlardaki ısı genleşmeler ancak 60000 dev/dak iş mili devrine kadar müsaade etmektedir. Daha küçük mikro kesicilerin kesme hızını yakalayabilmek için daha yüksek devirlere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu durumda hava türbinli rulmanlar kullanılarak iş mili devri yükseltilmektedir (Rooks, 2004). Resim 2.14'te hava takviyeli bir takım tutucu görünmektedir.



Resim 2.14 Pnomatik destekli anahtarsız mandren tutuculu iş mili (İnt. Kyn.5).

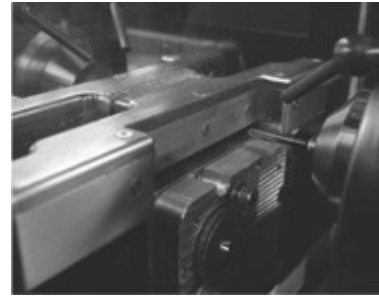
Mikro frezelemede takım değiştirme ve sıfırlama, freze uçlarının küçük olmasından dolayı hassasiyet gerektirir. Bu nedenle takım değiştirme robot kollarla yapıldıktan sonra sıfırlama lazer optik gözlerle gerçekleştirilmektedir (Resim 2.15).



a



b



c

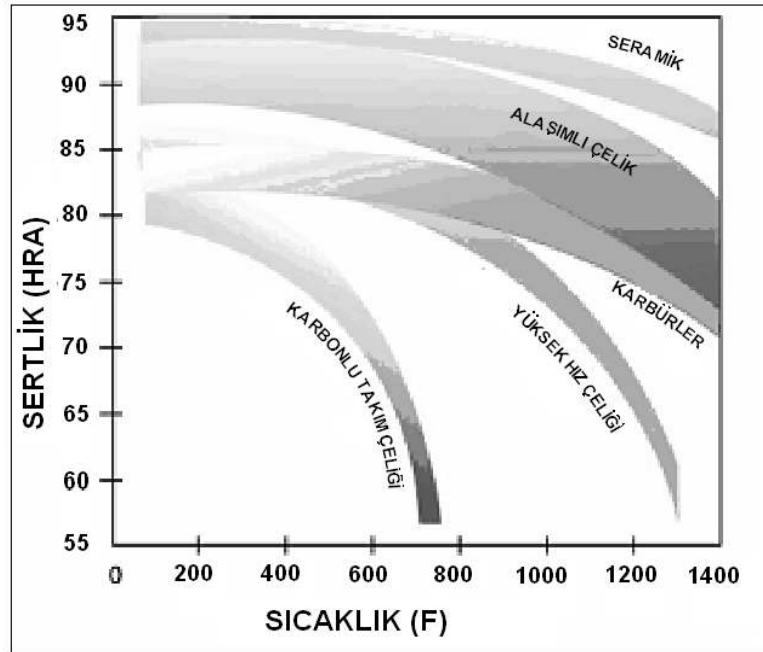
Resim 2.15 Mikro freze takım değiştirme ve sıfırlama (a) Robot kol ile takım değiştirme, (b) Takım magazini, (c) Lazer ile sıfırlama (İnt. Kyn.9).

Mikro frezelemede takım yolları kompleks ve bilgi blokları binlerce satırdan oluşabilmektedir. Bu nedenle bilgi akışının ve hareket kontrolünü kesintiye uğramaması gerekmektedir. Ayrıca ölçü hassasiyeti önem arz ettiğinden tezgâhın bulunduğu alanın nem ve sıcaklık değerli sabit tutulmalıdır (İnt. Kyn.5).

2.3.2. Kullanılan Kesici Takımlar ve Özellikleri

2.3.2.1 Kesici Takım Malzemesi

Yüksek hassasiyetli makinelerde genellikle iki tip malzemeden üretilen kesici takım kullanılır. Bunlardan birisi elmas kesicilerdir. Ancak, demir içeren materyalleri işlemede elmas kesicilerin yetenekleri sınırlıdır. Demir ve elmas arasındaki yüksek kimyasal ilgi yüksek aşınma sebebidir. Kullanım alanı demir olmayan elementleri işleme ile sınırlı olmasında dolayı mikro kesici uçlar genel olarak WC'den imal edilir ki bu takımlar sert ve sağlam oldukları için yüksek sıcaklıklarda (Şekil 2.12) çalışabilme özelliğine sahiptir (Kalpakjian and Schmid, 2002).



Şekil 2.11 Takım malzemelerinin sıcaklığa bağlı sertliklerinin değişimi (Chae, Park and Freiheit, 2006).

Sert maden uçlar, sıcaklığa dayanıklı takım malzemesi olup sert karbür parçacıkları ve sünek metallerle birleşmesiyle üretilir. Bu malzemeler, ilk olarak 1920’li yıllarda Almanya’da elmas kullanımının pahalı olmasından dolayı ve yeterli aşınma dirençli kalıp malzemesi üretmek amacıyla geliştirilmiştir. Önce WC ile kobalt bağlayıcı kullanılarak üretilmiştir. Fakat birçok hatalara sahip kaba bir yapı gözlenerek kesici takım ve kalıp malzemesi olarak tatmin edici bulunmamıştır. 1923 yılında Fransa’da toz metalürjisi tekniği ile ince WC tozlarla az miktarda demir, nikel veya kobalt tozları karıştırılarak preslenmiştir. Sonra yaklaşık 1300 °C de sinterlenmiştir. O zamandan beri WC-Co esaslı karbürü malzemeler, farklı malzemeler ve kesme operasyonları için değişik tipleri olan karbürler geliştirilmiştir. Karbür, üretiminin yaklaşık %50 talaş kaldırma işlemlerinde kullanılmaktadır. Bu malzemeler “sinterlenmiş karbür “ olarak da adlandırılır. Bunlar iyi aşınma direnci gösterdiklerinden 40 m/dak’dan 350 m/dak kesme hızına kadar sertliğini ve kesiciliğini kaybetmeden etkili şekilde kullanılabilmektedir (İnt. Kyn.3).

2.3.2.2 Kesici Takım Kaplamaları

Kaplama; kesme kuvvetini, oluşan ısıyı ve aşınmayı büyük oranda azaltarak geçici bir yağlayıcı görevi yapmaktadır. Bu, özellikle daha kaliteli yüzey elde edilmek istenildiğinde daha yüksek hızların kullanılmasına imkân sağlar. Kesici takım malzemelerindeki en önemli gelişme, takımların yüzeylerinin birkaç mikron kalınlığındaki tabaka ile kaplanmasıdır. Kesici takımların yüzey kaplamalarında birçok element kullanılmaktadır (İnt. Kyn.3). Aşağıda her bir kaplama malzemesine ait detaylı bilgiler verilmiştir.

2.3.2.2.1 TiN Kaplama

En eski ve en bilinen kaplama çeşididir. Demir, çelik vb. metaller, metal işleme, kesme kalıpları, aşınmaya maruz parçalar, tıbbi ve dekoratif parçalar için genel amaçlı bir kaplamadır. Matkap uçları, frezeler, bıçaklar, broşlar, kesme-bükme kalıpları, zımbalar, fellow ve azdırma çakıları gibi birçok takım ve kalıpta kullanılmakta, performans yönünden kaplanan parçaların ömründe 3~30 kat arasında bir artış sağlamaktadır.

Kaplanan parçaların ömründeki artış, kesici takımların tipine, işlenen malzemenin cinsine, kullanılan tezgâhın cinsine, kullanılan soğutma sıvısına ve işlem kalitesine göre farklılıklar gösterir (İnt. Kyn.4). Çizelge 2.1’de TiN kaplamaya ait kimyasal özellikler verilmiştir.

Çizelge 2.1 TiN kaplama kimyasal özellikleri (İnt. Kyn.4).

Kimyasal Bileşimi	TiN
Sertlik (HV 0,05)	2900 ± 200
Oksidasyon Sıcaklığı (°C)	550
Sürtünme katsayısı	0,65
Yüzey Pürüzlülüğü (Ra µm)	0,2
Kalınlık (µm)	2-3
Renk	Altın Sarısı

Yüksek sertliğe ve düşük sürtünme katsayısına sahip olan TiN, metalin metale sürtünmesinden dolayı oluşan aşınmaları önler, kayganlığı artırır, yapışma-sarma gibi problemleri minimuma indirir. Kesme anında uç birikintilerin büyümesini engelleyerek iş parçası yüzeyinin temiz çıkmasını sağlar. Ayrıca ısı iletkenliğinin düşük olması nedeniyle takıma ısı transferini engelleyerek takım ve tezgâhla daha yüksek devirlerde çalışma olanağı sağlar. Sürtünme katsayısı düşük olduğu için kesme ve sürtünme kuvveti azalır, kaygan yüzey de talaş akışını kolaylaştırır (İnt. Kyn.4).

2.3.2.2.2 Zafır (AlTiN-TiAlN) Kaplama

Zafır kaplamalar, özellikle yüksek sıcaklıklarda çalışan kalıp ve takımlar için idealdir. Yüksek kesme sıcaklığında iyi ısı iletkenliği ve kimyasal kararlılığı ile kesici uçta oluşan ısıyı talaş parçalarına aktarır. Böylece daha yüksek hızlarda çalışmaya olanak vererek daha hızlı üretim, daha az bakım, daha az bileme, daha az ayar sağlayarak üretimin daha verimli olmasını ve parça ömrünün uzun olmasını sağlar. Özellikle

sürekli talaş kaldıran takımlarda iyi performans göstermekte, yüksek ömür artışı sağlamaktadır. Çizelge 2.2’de AlTiN kaplamaya ait kimyasal özellikler verilmiştir.

Çizelge 2.2 AlTiN kaplama kimyasal özellikleri (İnt. Kyn.4).

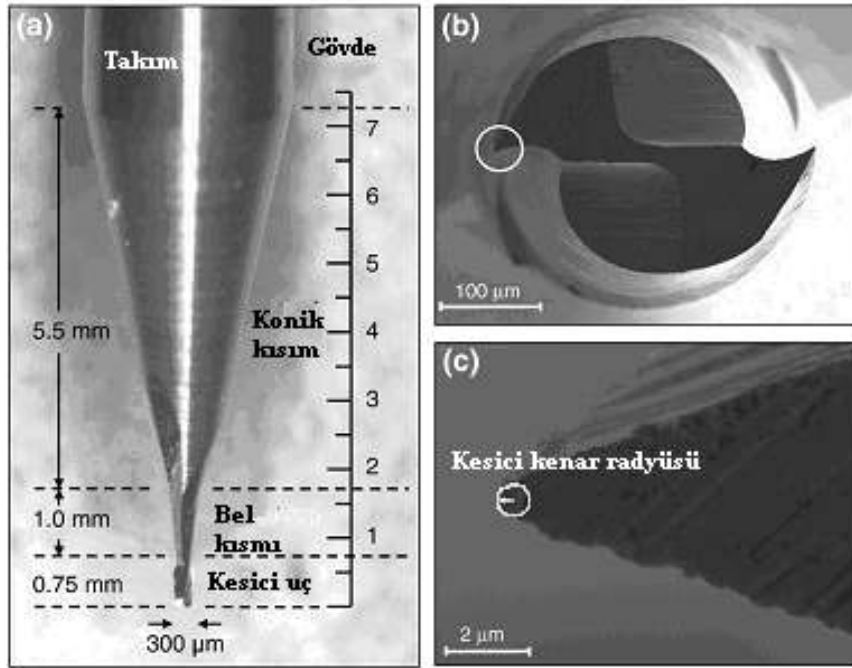
Kimyasal Bileşimi	TiAlN ve AlTiN
Sertlik (HV 0,05)	3600±400
Oksidasyon Sıcaklığı (°C)	800
Sürtünme katsayısı	0,42
Yüzey Pürüzlülüğü (Ra µm)	2-5
Kalınlık (µm)	0,2
Renk	Siyah / Füme

Zafır kaplamalar oksitlenme sıcaklığı en yüksek (800°C) kaplama çeşitleridir. Buna ilaveten iyi ısıl iletkenliğine sahiptir. İyi ısıl iletkenliği malzemenin ısıl yorulmasını önleyerek, yüksek sıcaklıklarda çalışan kalıp ve takımları aşınmaya karşı korur. Zafır kaplamalar; titan, nikel alaşımları, paslanmaz çelik ve dökme demir, sıcak dövme malzeme, basınçlı döküm (enjeksiyon) ve ekstrüzyon kökenli malzeme ile yüksek hızda çalışan soğutmasız ve sertleştirilmiş çelik malzemenin işlemlerinde iyi sonuç vermektedir (İnt. Kyn.4).

2.3.2.3 Kesici Takım Geometrisi

Mikro frezelemede kullanılan kesici takımlarının boyutları, mikro parçalarından talaş kaldırma hacmini ve hassasiyetlerinin sınırlarını belirler. Daha küçük takımlar, boyutlarına göre daha az ısıl genişlemeye maruz kaldıkları için birçok avantajı beraberinde getirmektedir. Takımlar kısa olması nedeniyle daha yüksek statik rijitliğe, daha yüksek dinamik stabiliteye ve üretimde daha az miktarda materyal ile kullanıldığı için daha düşük maliyete sahiptirler (Cox, Newby, ParkLiang, 2004).

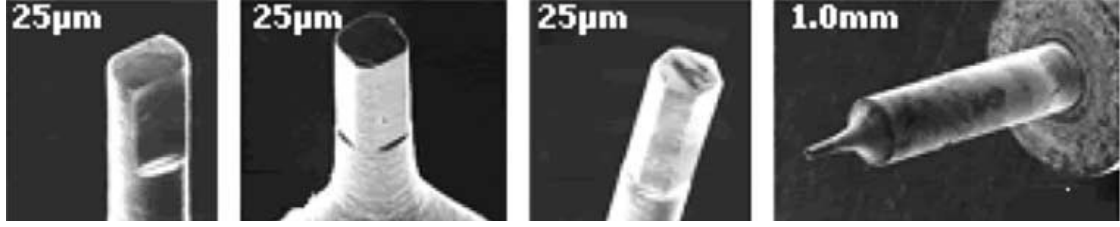
Mikro frezeleme ilk kullanılmaya başlanıldığı zamanlarda ve sonrasında çeşitli mikro takımlar üretilmiştir. Bunların bazıları araştırma için, bazıları ise ticari anlamda kullanıma sunulmuştur. Günümüzde mikro frezeleme uygulamalarında iki ağızlı ve helis açılı WC freze uçları (Şekil 2.13) kullanılmaktadır. Ancak Schaller (1999) kesici takım çapının 50µm'dan daha küçük olması durumunda, rijitliklerini korumaları ve üretim tekniği sınırlarını düşürmek için, sıfır helis açılına sahip olması gerektiğini söylemiştir (Chae, Park and Freiheit, 2006). Heaney et al. araştırmalarında 0,3 mm çaplı elmas kaplı WC freze ucu kullanmışlardır. SEM aracılığı ile çekilen fotoğraflarda kesici takıma ait geometri detayları verilmiştir (Şekil 2.13). Kesici uç radyüsü üretimde çok kontrol edilememesine rağmen kesmeye etkileri araştırılmak üzere fotoğraflarda yaklaşık olarak ölçüldüğü görülüyor (Heaney, Sumant, Torres, Carpick and Pfefferkorn, 2008).



Şekil 2.12 Mikro freze ucu geometrisi (Heaney, Sumant, Torres, Carpick and Pfefferkorn, 2008).

Araştırma amaçlı birçok mikro takım imal edilmiştir. Onikura et al. (2000) takımdaki aşındırma gücünü azaltmak için ultrasonik vibrasyonlu öğütme tekniğini kullanarak 11 µm çapında bir mikro-karbür takım imal etmişlerdir. Araştırmacılar Sandia

Laboratuvarlarında 25 μm çapında, beş kesici köşesi bulunan WC uçlu bir takımı iyon demeti yöntemi ile imal etmişlerdir (Resim 2.16).



Resim 2.16 Araştırma için üretilen mikro freze uçları (İnt. Kyn.5).

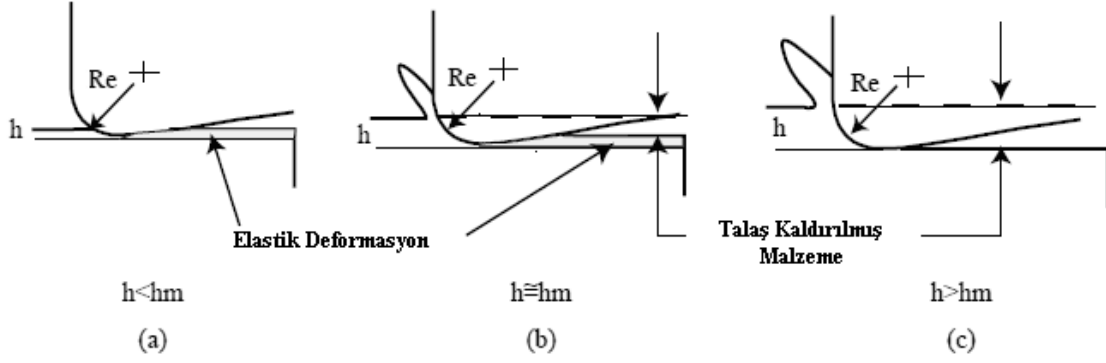
Schaller (1999) elmas taşlama diski kullanarak WC mikro takım imal etmiştir. Bu takımlar üzerinde tek köşe bulunan çakılardı ve ölçüleri ise 35~120 μm arasında değişmekteydi. Fang (2005) sonlu elemanlar metodu ve doğrulanmış deneysel tahminleri kullanarak, çeşitli şekillerde (üçgen ve yarım daire) mikro karbür takımları üzerine araştırma yapmıştır. Elde edilen bulgular, yarım daire şekilli takımlar üçgen veya konvansiyonel iki kanallı takımlardan daha iyi olduğunu göstermiştir. Üretilen takımların üzerinde sıfır helis açısı bulunduğu ve takım üzerinde talaş boşlatma kanalı olmadığından elde edilen yüzey kalitesi ise düşük olmuştur (Chae, Park and Freiheit, 2006).

2.3.3 Mikro Frezelemede Talaşın Oluşumu ve Minimum Talaş Derinliği

Talaş oluşumu genellikle doğrusal olmayan dinamik bir süreçtir. Mikro frezelemede geleneksel frezelemeden farklı olarak kesme derinliği kritik talaş oluşumunun altına indiğinde, kesme gerçekleşmeyebilir. Bunun yerine iş parçası elastik olarak deformasyona uğrar. (J. D. Kim and Kim, 1995).

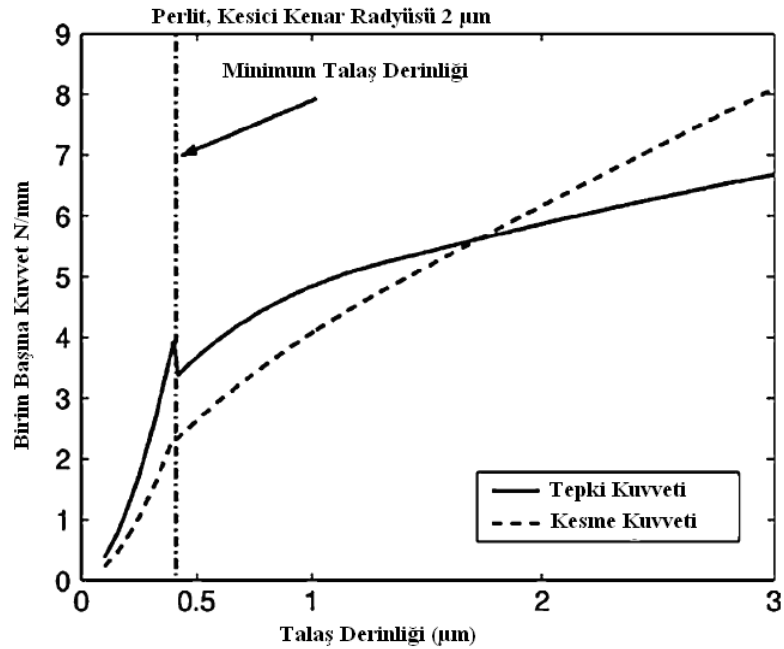
Minimum talaş derinliği kavramı Şekil 2.14'te açıklanmıştır. H_m , minimum talaş derinliği, h gerçekte verilmek istenen talaş derinliği ve R_e takım uç yarıçapı olarak tanımlanmıştır. “ h ” değeri kritik talaş derinliğini geçmediği zamanlarda malzeme üzerinde elastik deformasyon gerçekleşir (Şekil 2.14-a). Talaş derinliği kritik seviyenin üstüne çıktıkça talaş oluşumu artar. Ancak deformasyon azda olsa devam eder (Şekil

2.14-b). Talaş derinliği kritik seviyenin üstüne çıktıktan sonra en verimli talaş kaldırma gerçekleşir(Şekil 2.14-c), (Chae, Park and Freiheit, 2006).



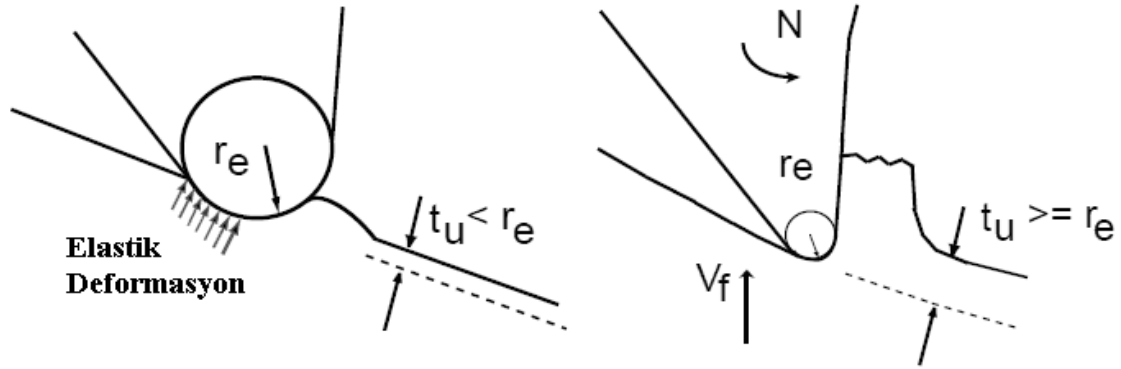
Şekil 2.13 Mikro frezelemede minimum talaş derinliği (Chae, Park and Freiheit, 2006).

Minimum talaş derinliğini tespit etmek amacı ile yapılan deneylerde kesme kuvvetleri ölçülmüş. Kesme kuvvetindeki ani sapma ve normalleşmenin başladığı noktada kritik talaş seviyesinin tahmini yoluna gidilmiştir(Şekil 2.15).



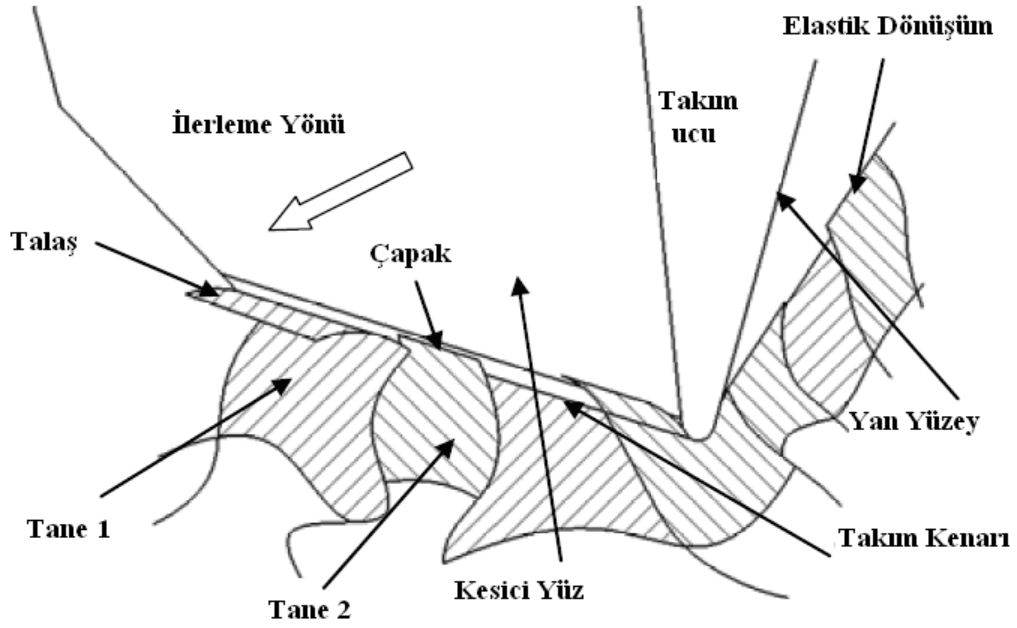
Şekil 2.14 Perlite malzemede kesme kuvvetleri ile minimum talaş derinliğinin tespiti (Chae, Park and Freiheit, 2006).

Özel et al. yaptıkları araştırmada sonlu elemanlar yöntemi ile talaş oluşumunu incelemişlerdir. Minimum talaş derinliğinin direk olarak takım uç yarıçapı ile bağlantılı olduğunu tespit etmişlerdir. Şekil 2.16’da talaşın oluşumu için talaş derinliği ile uç radyüsü arasındaki bağıntı gösteriliyor. Şekilde “N” iş mili dönüş yolu, “ V_f ” kesme kuvveti, “ r_e ” kesici uç yarıçapı ve “ t_u ” talaş derinliği olarak tanımlanmıştır. Talaş derinliği uç yarıçapında küçük olduğu zamanlarda malzeme üzerinde elastik deformasyon gerçekleşiyor. Bu durumda talaş oluşumu gerçekleşmiyor. Talaş derinliği uç yarıçapını geçtiği anda talaş oluşumu başlıyor. İşte bu nokta minimum talaş derinliği veya kritik talaş derinliği olarak isimlendirilmektedir (Özel, Liu, Dhanorker 2007).



Şekil 2.15 Kesici uç yarıçapının minimum talaş derinliğine etkisi (Özel, Liu, Dhanorker 2007).

Wang et al. çalışmalarında malzeme tane yapısının mikro kesmeye olan etkilerini araştırmışlardır. Sonuç olarak malzemenin tane yapısının talaşın oluşumunu doğrudan etkilediğini tespit etmiştir. Büyük ve kompleks tane yapılı malzemelerde kesmenin zorlaştığını belirtmişlerdir. Şekil 2.17’de kesme işlemi ve mikro yapıdaki etkileri gösterilmiştir(Wang, Gong, Abba, Chen, Shi and Cai, 2007).



Şekil 2.16 Bölgesel kesme (Wang, Gong, Abba, Chen, Shi and Cai, 2007).

2.3.4 Mikro Frezelemede Kesme Kuvvetleri

Mikro frezeleme mikro çok boyutlu bir süreçtir. Verimlilik sınırı ve yavaş malzeme talaş kaldırma oranları maliyeti arttırmaktadır. Mikro ölçekte takım ömrünü etkileyen kesme kuvvetlerini makul talaş kaldırma oranlarını sağlayacak kabul edilebilir düzeylere düşürülmesi gerekir. Kesme kuvvetlerini mikro frezeleme sırasında tahmin edebilmek, takım kırılmasını azaltmak veya kırılmasını ortadan kaldırmak için yardımcı olacaktır. Kesme kuvvetlerinin doğru modellenmesi için, titreşim, yüzey kalitesi, talaşlı imalat kararlılığının doğru tahmin edilmesi gereklidir. Kesme kuvvetlerini tahmin etmek için birçok farklı yöntem geliştirilmiştir. Bu modeller üç ana kategoride olmak üzere; ampirik (deneye dayalı), analitik ve mekanik yöntemler şeklinde sınıflandırılabilir (Newby, 2005).

Ampirik yöntemde, bir dizi işleme deneyleri yapılarak, takım ömrü, kesme kuvvetleri gibi performans ölçümleri ve takım aşınması ölçülür. Bu sonuçlardan çıkan kesme şartları ampirik fonksiyonlar kullanılarak ilişkilendirilir. Ampirik yöntemlerde yapılan

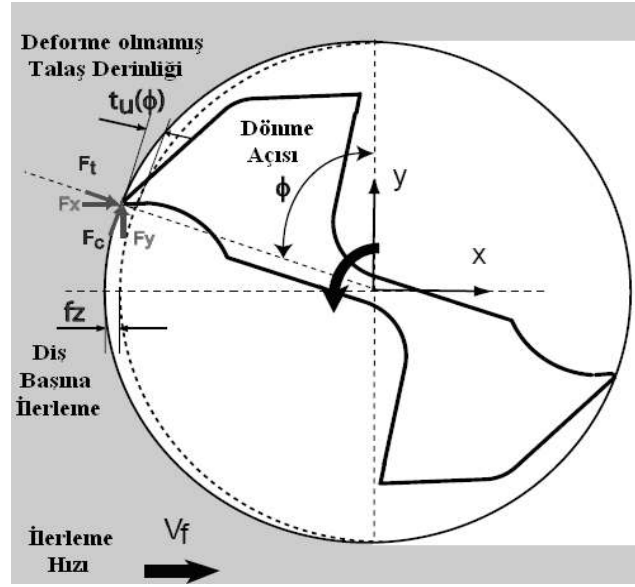
denemelerde başarıya ulaşmak için kullanılan parametrelerin sınırlı olması gerekir (Newby, 2005).

Analitik kesim sırasında oluşan fiziksel mekanizmalar modellenir. Ancak karmaşık mekanizmalarda, yüksek gerilim oranları, yüksek sıcaklık geçişleri, kombine elastik ve plastik deformasyonların analitik modelleri gibi tamamen kesici kenar ucun yüzünde meydana gelen olayları karakterize etmek mümkün değildir. Bu yöntemde, kesme kuvvetinin talaş kesit alanı ile orantılı olduğu varsayılır (Newby, 2005).

Mekanik yöntemde kesici geometrisi, kesme koşulları, iş parçası malzeme özellikleri gibi sabit orantılar kullanılarak kalibrasyon testleri ile kesme kuvvetleri elde edilir. Özel kesim baskıların genellikle elde edilir. Geleneksel olarak, kesme kuvveti modelinde kalibrasyonu iş mili hızı, ilerleme hızı oranı ve kesme derinliği gibi farklı kombinasyonların testleri çalışan tarafından yapılır. Yüzeyde oluşan istikrarsızlık, kesme açısı gibi fonksiyonlar takip edilir (Newby, 2005).

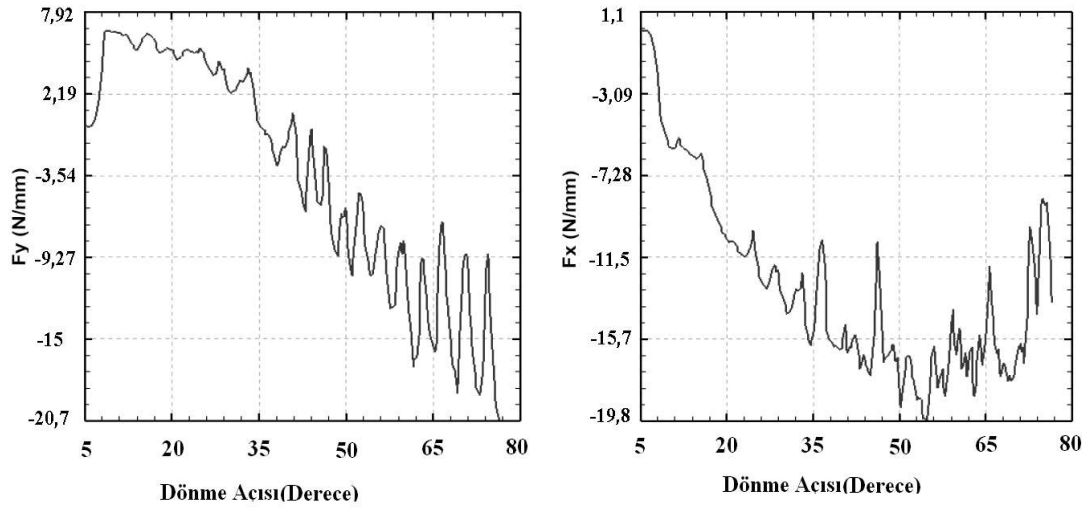
Budak (2000), kesme kuvvetinin doğrudan talaş oluşumu ile ilgili olduğunu, ayrıca takım deformasyonunun, ilerleme hızının ve takım gerilmelerinin kesme kuvvetlerini doğrudan etkilediğini ifade etmiştir. Geliştirilmiş ve iyi düzenlenmiş kesme kuvveti parametreleri operatörlerin çalışma esnasında doğru kesme şartlarını oluşturmaya yardımcı olur, demiştir. Kesme kuvveti, kayma ve sürtünme kuvveti olmak üzere iki ayrı kolda incelenmektedir. Mikro frezelemede talaş oluşumu ile kenar yarıçapı arasında oluşan denklem, geleneksel frezelemedeki denklemlerden farklılık gösterir. Ayrıca mikro kesmede talaşın oluşumunda malzeme üzerinde elastik-plastik deformasyon oluşmasından dolayı kesme kuvvetleri çok farklı şekilde davranış gösterirler (Chae, Park and Freiheit, 2006).

Özel et al. sonlu elemanlar yönteminde kullanmak üzere kesmeyi oluşturan parametreleri analiz etmişlerdir. Talaşın oluşum açısı ve oluşan kesme kuvvetleri modellenerek deney öncesinde kesme işlemi sanal ortamda simüle edilmiştir. Sanal ortamda yapılan deney neticesinde frezeleme işlemi öncesinde referans alınacak bilgilere ulaşılmıştır (Şekil 2.18), (Özel, Liu and Dhanorker, 2007).



Şekil 2.17 Mikro frezeleme işlemi sırasında talaş derinliği ve düzlemsel kuvvetler (Özel, Liu and Dhanorker, 2007).

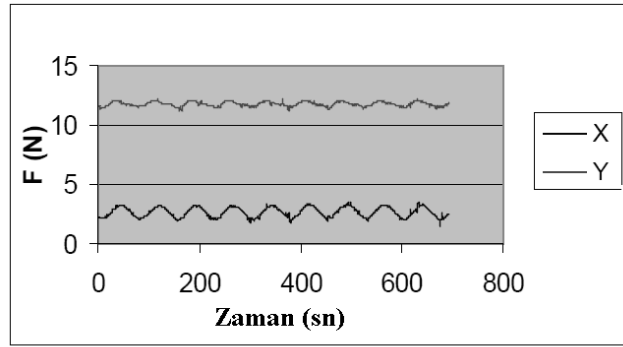
AISI 4340 ve Al 2024-T6 malzemeler üzerinde yapılan deneyler neticesinde kesme kuvvetlerinin devamlı şekilde dalgalandığı (Şekil 2.19) ve bununla birlikte kırılma ve deformasyonlara neden olduğu ifade edilmiştir (Özel, Liu and Dhanorker, 2007).



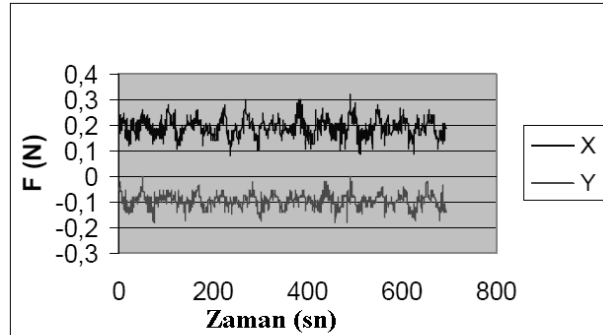
Şekil 2.18 AISI 4340 çelik malzemede oluşan kesme kuvvetleri (Özel, Liu and Dhanorker, 2007).

Kim et al. (1995) makro ve mikro işlemler arasında oluşan kesme kuvvetlerini incelemiştir. Bilinen geleneksel yöntemde kayma gerilmesinin kayma düzlemi boyunca oluştuğunu, ancak mikro kesme işleminde ise kesme yapan köşe boyunca devam ettiğini ortaya koymuşlardır. Ayrıca yan yüzey boyunca sürtünme kuvveti oluştuğunu belirtmişlerdir (Chae, Park and Freiheit, 2006).

Rodriguez et al. yaptıkları araştırmada Al 7075 malzeme üzerindeki deney sonucunda kesme hızına bağlı kesme kuvvetlerine analiz etmişlerdir. Çıkan sonuçlarda düşük kesme hızı (130 m/dak) ve 3 µm talaş derinliği kullanılan deneyde yüksek kesme kuvvetleri çıkmıştır (Şekil 2.20). Ancak diğer yapılan deneyde kesme hızı 240 m/dak ve talaş derinliği 5 µm kullanılmıştır (Şekil 2.21). Kullanılan parametre değerlerinin daha yüksek olmasına karşılık kesme kuvvetleri çok küçük değerlerde çıkmıştır (Rodriguez, Perez, Labarga and Vizan, 2008).



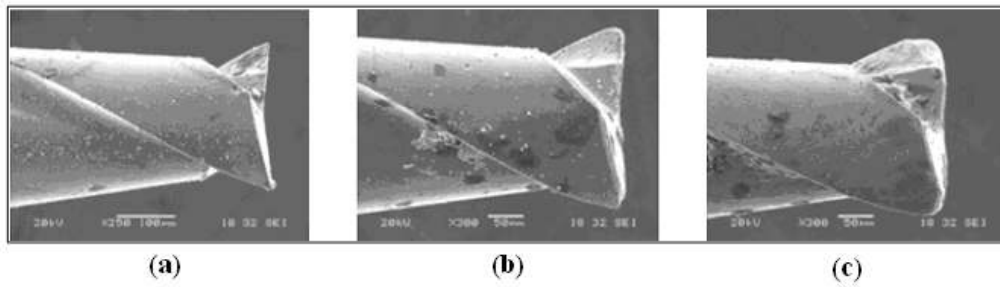
Şekil 2.19 130 m/dak kesme hızı ve 3 µm talaş derinliği için X ve Y yönündeki kesme kuvvetlerinin değişimi (Rodriguez, Perez, Labarga and Vizan, 2008).



Şekil 2.20 240 m/dak kesme hızı ve 3 µm talaş derinliği için X ve Y yönündeki kesme kuvvetlerinin değişimi (Rodriguez, Perez, Labarga and Vizan, 2008).

2.3.5 Mikro Frezelemede Takım Ömrü ve Aşınmayı Etkileyen Faktörler

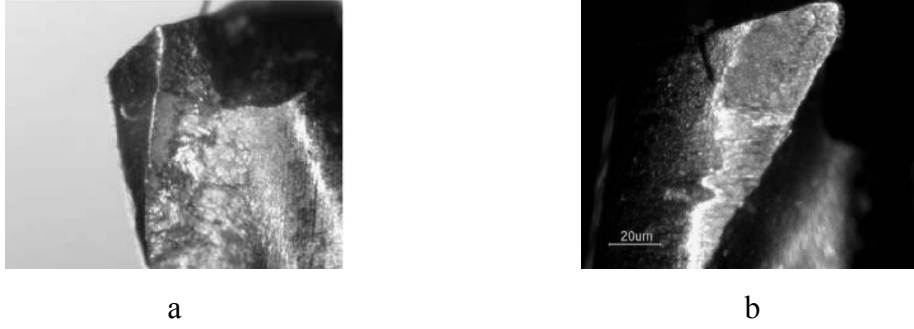
Mikro frezelemede takım aşınması, kesici kenar ve köşe profilinin değişerek deformasyona uğraması ve iş görmez hale gelmesi olarak tanımlanabilir. Sonuç itibarı ile mikro parçada hassasiyet bozulur ve yüzey pürüzlülüğü zarar görür. Müteakiben kesme kuvvetleri ve titreşim artar ve çapak oluşumu başlar. Çapak oluşumu mikro frezelemede en son istenen faktördür. Çapak alma işlemi geleneksel frezelemede olduğu gibi koyca alınamadığı için kesme işlemi sırasında oluşmasını engelleyecek tedbirler alınması tercih edilir. 0,2 mm TiAlN kaplı WC freze ucu ile kanal açma işleminde SEM ile tespit edilmiş aşınma fotoğrafları Resim 2.17’de verilmiştir. Resim 2.17’de görülen takım ile 60 HRC sertliğine sahip çelik malzeme 10 µm talaş derinliğinde 0,4 µm dış başına ilerleme ile 60000 iş mili devrinde işlenmiştir. Resim 2.17-a’da takımın orijinal hali, b’de 0,2 mm³ talaş kaldırıldıktan sonraki hali görülmektedir. Burada takımın ucunda değişim olduğu tespit edilmiştir. Ve en son c’de 0,1 mm³ talaş kaldırılmıştır. Burada ise takım ucunda büyük oranda deformasyon ve kenar radyüsünün büyüdüğü gözlenmiştir. Mikro frezelemede genellikle takım köşelerinde bu tür aşınmalar kesme esnasında takımda oluşan sapmalarından da kaynaklanmaktadır (Lacalle and Lamikiz, 2009).



Resim 2.17 TiAlN kaplamalı WC mikro freze takımının aşınması (Lacalle and Lamikiz, 2009).

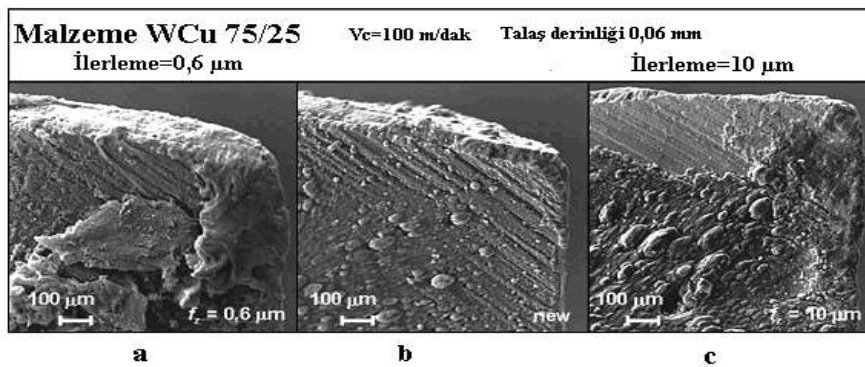
Rodriguez et al. yaptıkları araştırmada Al 7075 malzeme üzerindeki deneyle takım ömrü kriterlerini incelemişlerdir. İlk deneyde kesme hızı (130 m/dak) ve 3 µm talaş derinliği kullanılmış ve takımda oluşan aşınmanın yüzeyde olduğunu gözlemlemişlerdir (Resim 2.18-a). İkinci deneyde ise kesme hızı 240 m/dak ve talaş derinliği 5 µm kullanılmıştır.

Bu parametrelerle oluşan aşınmanın ise sadece kenarda olduğu gözlemlenmiştir (Resim 2.18-b). Takım aşınmasının çok hızlı bir şekilde geliştiğini ve aşınma şeklinin geleneksel frezelemeye benzediğini ifade edilmiştir (Rodriguez, Perez, Labarga and Vizan, 2008).



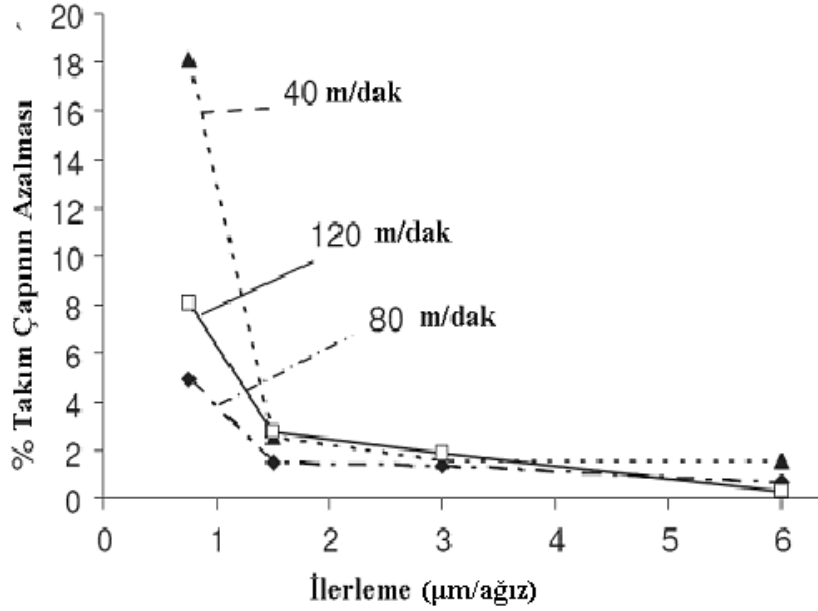
Resim 2.18 Kesme hızına bağlı takım aşınması, a) Kesme hızı 130 m/dak, b) Kesme hızı 240 m/dak (Rodriguez, Perez, Labarga and Vizan, 2008).

Uhlman et al. sinterlenmiş WCu malzemenin üç farklı tane yapısına sahip türevleri üzerinde yaptıkları araştırmada takım aşınma durumunu tespit etmişlerdir. Deneyde kesici olarak 0,5 mm çapında 2 ağızlı karbür uç ve 0,5 mm çapında TiAlN kaplamalı karbür uç kullanılmıştır. 120 mm boyda kanal işlendikten sonraki aşınma durumları SEM ile analiz edilmiştir. Resim 2.19-a'da ilerleme değerlerinin düşük olmasından kaynaklanan ısı ve malzemenin plastik deformasyonu sonucu meydana gelen yapışmalar görülmektedir. Resim 2.19-b'da mikro frezenin ilk hali görünmektedir. Resim 2.19-c'de kesme kuvvetlerinin etkisi ile kaplama çatlamış ve kesici aşınma etkilerine maruz kalmaya başlamıştır (Uhlmann, Piltz and Schauer, 2005).



Resim 2.19 İlerlemeye bağlı aşınma durumu (Uhlmann, Piltz and Schauer, 2005)

Ozdoğanlar ve Filiz, OFHC malzemesinin mikro frezeleme yöntemi ile işlenmesinde, kesme kuvvetlerine ve ilerlemeye bağlı oluşan aşınmayı, yapılan deneyler sonucunda tespit etmişlerdir. Yapılan deneyde 254 μm çaplı kesici uç ile 0,75–6 μm arasında değişen dört ilerleme değeri ve 3 farklı kesme hızında (40–80–120 m/dak) deney gerçekleştirmişlerdir. Deney sonucunda 40 m/dak kesme hızında %20 oranı ile en büyük takım aşınması meydana gelmiştir (Şekil 2.22). Ayrıca diş başına 1,5 μm ilerleme hızı da aşınmanın en çok meydana geldiği yer olarak tespit edilmiştir. Takım aşınması için en ideal şartlar 6 $\mu\text{m}/\text{diş}$ ilerleme ve 120 m/dak kesme hızı belirlenmiştir. Ayrıca kesme kuvvetlerinin fazla olması WC tanelerinin Co bağlayıcısından çok çabuk kopmasına ve aşınmanın hızlı olmasına neden olduğu söylenmiştir (Ozdoğanlar ve Filiz, 2006).



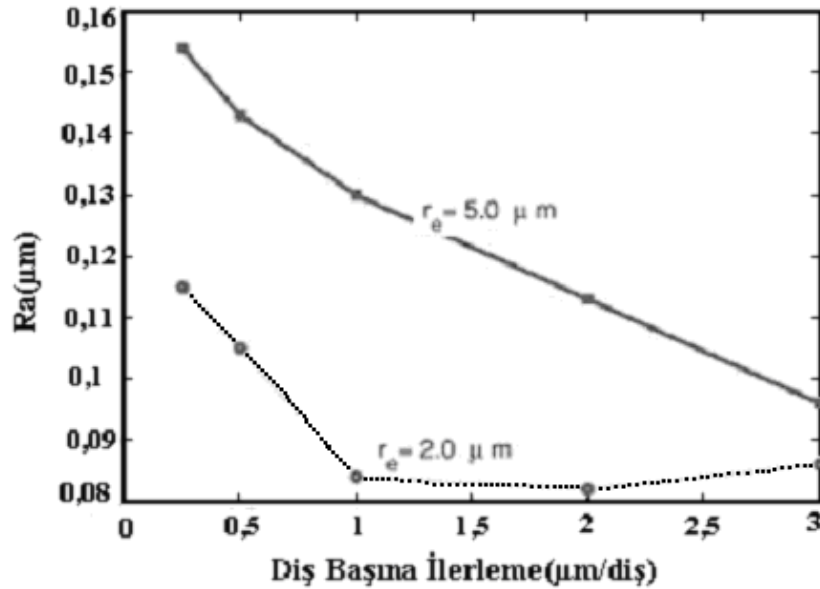
Şekil 2.21 Farklı ilerleme değerleri için takım çapındaki azalmaya bağlı aşınma değerleri (Ozdoğanlar ve Filiz, 2006)

2.3.6 Mikro Frezelemede Yüzey Pürüzlülüğü ve Etkileyen Faktörler

Mikro frezelemede kullanım yerleri ve tolerans hassasiyeti nedeni ile en önemli faktörlerin başında yüzey pürüzlülüğü gelmektedir. Mikro işleme parametreleri, makine faktörleri ve malzeme gibi birçok faktörün yanında, ana neden olarak mikro ölçekli takımın boyut etkisi gösterilebilir (Wang, Gong, Abba, Chen, Shi and Cai, 2007).

Mikro işlemlerde elde edilen yüzey pürüzlülüğünü, şu an var olan diğer geleneksel imalat yöntemleri ile elde etmek neredeyse imkânsızdır. Kalıp teknolojilerinde küçük nesnelere parlatma işlemi elle yapılmaktadır. Mikro kalıplara bu yöntemle parlatma işlemi yapmak imkânsızdır. Ayrıca mikro frezeleme sürecinde meydana gelen çapaklar, minyatür olmaları nedeni ile alınamamaktadır. Alınması durumunda bile yapılacak işlemle mikron hassasiyetindeki parçalarda kalibrasyon yada pürüzlülük sorunlarına yol açacaktır. Bu nedenle önlemlerin alınacağı ilk nokta olan takım unsuru büyük önem arz etmektedir.

Uhlmann et al. sinterlenmiş WC bakır farklı kompozit malzemeler için yapılan mikro frezeleme deneylerinde, homojen bir mikro yapı ve homojen bir tane boyut dağılımının boyutsal doğruluk ve yüzey kalitesi üzerinde olumlu etkisi olduğunu tespit etmişlerdir (Uhlmann, Piltz and Schauer, 2005). Vogler (2004) et al. mikro frezeleme işlemi sürecinde oluşan yüzey pürüzlülüğü üzerinde yaptıkları araştırmada, pürüzlülüğü etkileyen en önemli parametrenin kesici kenar yarıçapı olduğunu söylemişlerdir (Şekil 2.23), (Vogler, DeVor and Kapoor, 2004).

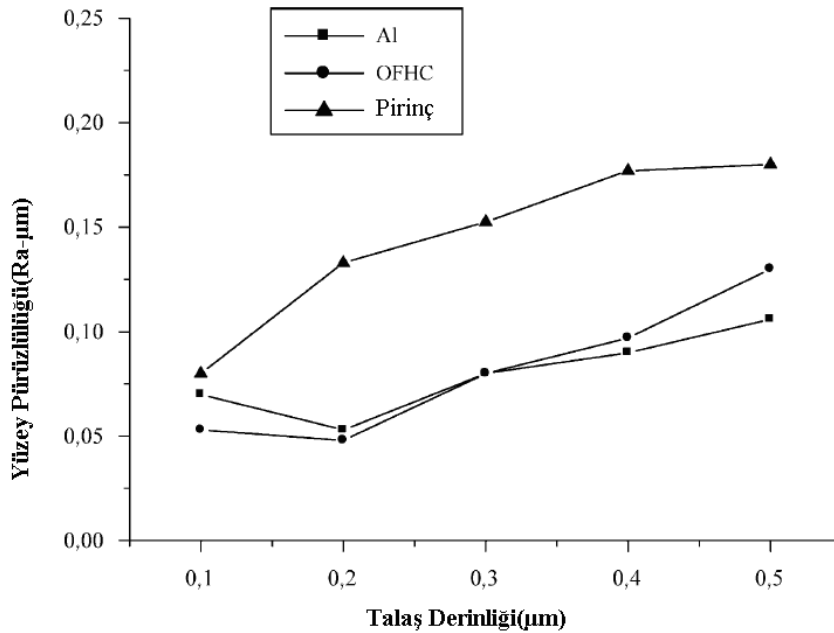


Şekil 2.22 Uç yarıçapının ve dış başına ilerlemenin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisi (Vogler, DeVor and Kapoor, 2004).

Aynı çalışmada takımın uç yarıçapının artması ile yüzey pürüzlülüğünün arttığını, ancak sabit bir takım uç yarıçapı ile ilerleme hızının da, yüzey pürüzlülüğünde önemli bir rol oynadığını vurgulamışlardır (Vogler, DeVor and Kapoor, 2004).

Pham et al. ise kaba ve ince dokulu olmak üzere Bakır ve Alüminyumun fazlarını işleyerek yaptıkları deneyde kaba dokulu malzemede yüzey kalitesinin %30~%50 daha iyi çıktığını söylemişlerdir. Ayrıca diş başına ilerleme değerinin yüzey pürüzlülüğünü kesme hızına göre daha fazla etkilediğini tespit etmişlerdir (Pham, Elkaseer, Popov, Dimov, Olejnik and Rosochowski, 2008).

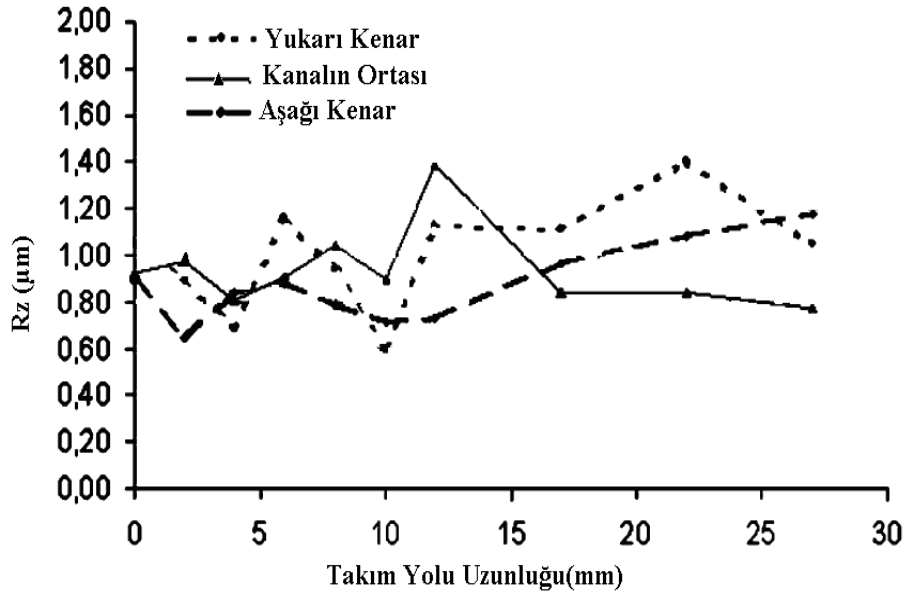
Son et al. farklı türdeki üç malzeme üzerinde uyguladıkları deney sonucunda elde ettikleri sonuçlardan yola çıkarak minimum talaş derinliğini saptamışlardır. Deneyi OFHC, Pirinç ve Alüminyum malzeme üzerinde 0,5 μm uç radyüslü elmas mikro freze takımı ile uygulayarak önce kesme kuvvetlerindeki değişimi ve talaş tiplerini tespit etmişlerdir (Son, Lim and Ahn, 2005). Yapılan deney sonucunda elde edilen talaş derinliğine bağlı ortalama yüzey pürüzlülük değerleri Şekil 2.24'te verilmiştir.



Şekil 2.23 OFCH, Pirinç ve Alüminyum için talaş derinliğine bağlı yüzey pürüzlülüğü (Son, Lim and Ahn, 2005).

Kesme kuvvetlerinden yola çıkarak Pirinç malzeme için minimum talaş derinliği 0,1 μm , diğerleri için 0,2 μm olarak tahmin edilmiştir (Şekil 2.24). Yüzey pürüzlülüğü grafiklerinde elde edilen sonuçlar tahminleri doğru çıkarmış ve en iyi sonuçlar minimum talaş derinliğinde elde edilmiştir (Son, Lim and Ahn, 2005).

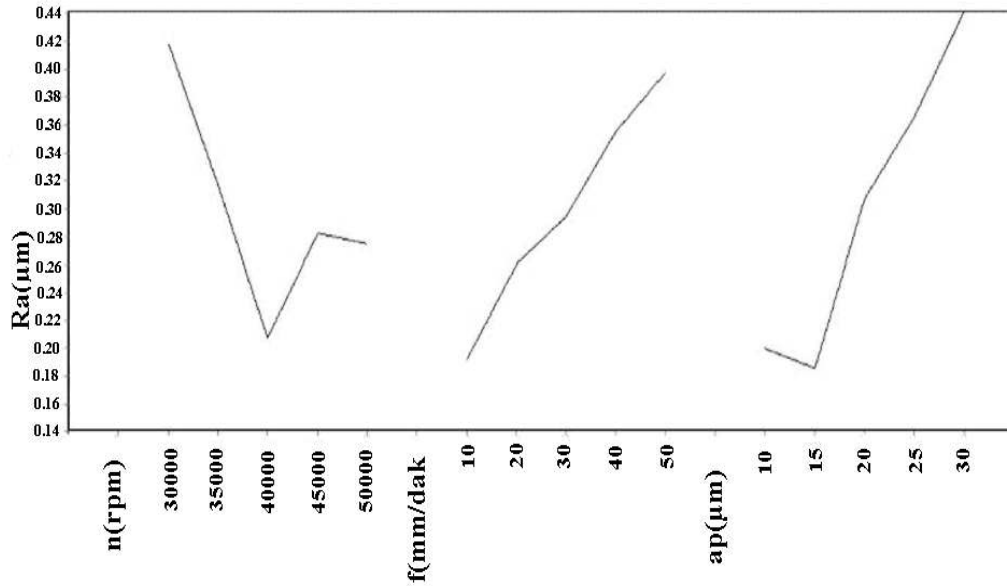
Schmidt and Tritschler yaptıkları araştırmada sert kalıp çeliklerini 0,1~0,5 mm arasında değişen mikro frezelerle işleyerek deney yapmışlardır. Mikro freze ucu malzeme üzerinden sabit parametre ile 3 adet yan yana olmak üzere, 30–50 mm uzunluğunda kanal işleyerek deney gerçekleştirilmiştir. Yüzey pürüzlülük değerleri 50 mm boyda 3 takım yolundan (aşağı, orta ve yukarı) alınmıştır. Sonucunda freze ucunun en iyi pürüzlülüğü orta kısımda, sonraki iyi kısım başında ve en kötü pürüzlülük değeri son kısımda çıkardığı söylenmiştir. Son kısımdaki kötü yüzey pürüzlülüğünün takımın aşınmasından kaynakladığı söylenmiştir. Ayrıca kanalın sağ ve sol yanında takımın kanal kenarlarına sürtünmesinden dolayı kararsızlığa uğradığını ve kısmi olarak yüzey pürüzlülüğünü bozduğunu tespit etmişlerdir (Şekil 2.25), (Schmidt and Tritschler, 2004).



Şekil 2.24 52 HRC AISI H11 sertleştirilmiş kalıp çeliği için yüzey pürüzlülüğünün işlenen yüzey boyunca değişimi (Schmidt and Tritschler, 2004).

Pürüzlülükteki dalgalanmalarında bu kararsızlıktan kaynaklandığı ileri sürülmüştür. Deneyde 52 HRC sertlikteki malzemede kullanılan ilerleme değerlerinden (1,5–3–5 μm) en iyi pürüzlülük değeri 3 μm için 0,7~0,9 μm arasında elde edilmiştir (Schmidt and Tritschler, 2004).

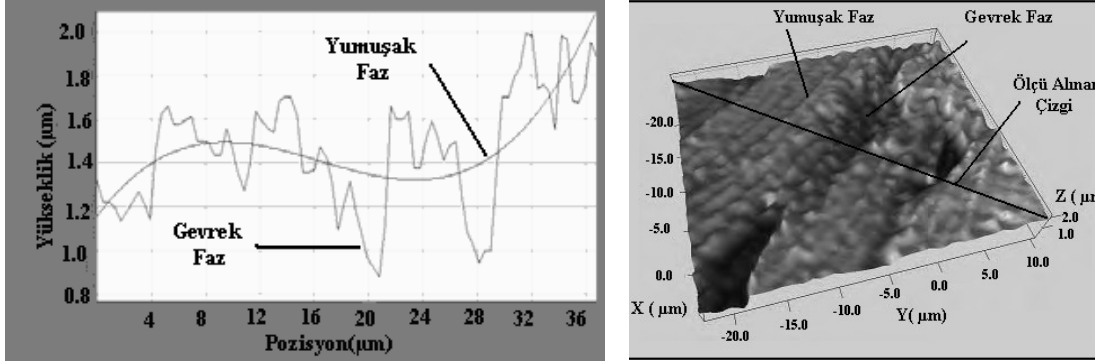
Wang et al. 400 μm çaplı 4 ağızlı mikro freze ucu kullanılarak Alüminyum 6061-T6 malzeme 6 mm boyunda 25 adet kanal açılarak deney yapmıştır. Parametreler tezgâh limitlerine göre düzenlenip çıkan sonuçlar sinir ağırları modeli ile yorumlanmıştır. En iyi yüzey kalitesi sonuçları (Şekil 2.26) 40000 iş mili devrinde, 10 mm/dak ilerleme hızında ve 15 μm talaş derinliğinde alınmıştır (Wang, Gong, Shi and Abba, 2009).



Şekil 2.25 Kesme parametrelerine bağlı yüzey pürüzlülüğünün değişimi (Wang, Gong, Shi and Abba, 2009).

Wang et al. araştırmalarında malzeme yapısının yüzey pürüzlülüğüne olan etkilerini incelemiştir. Yaptıkları deney sonucunda elde ettikleri sonuçlarından (Şekil 2.27-a) yola çıkarak yüzey geometrisini 3 boyutlu simüle (Şekil 2.27-b) etmişlerdir. Ayrıca SEM fotoğrafları ile tespit etmişlerdir (Resim 2.20). Deney Al 6061 malzeme üzerinde 25000 dev/dak iş mili hızı, 10 μm talaş derinliği ve 20 mm/dak ilerleme hızı ile

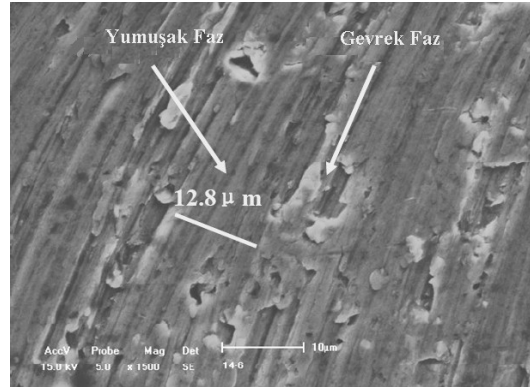
gerçekleştirmişlerdir. Sonuçta yüzey pürüzlülüğü aynı çıkmasına rağmen, gevrek fazın olduğu bölgelerde kırılma ve kazınmaların daha olduğunu ifade edilmiştir (Wang, Gong, Abba, Chen, Shi and Cai, 2007).



(a)

(b)

Şekil 2.26 Al 6061 malzemenin tane yapısının yüzey pürüzlülüğüne etkisi (Wang, Gong, Abba, Chen, Shi and Cai, 2007).

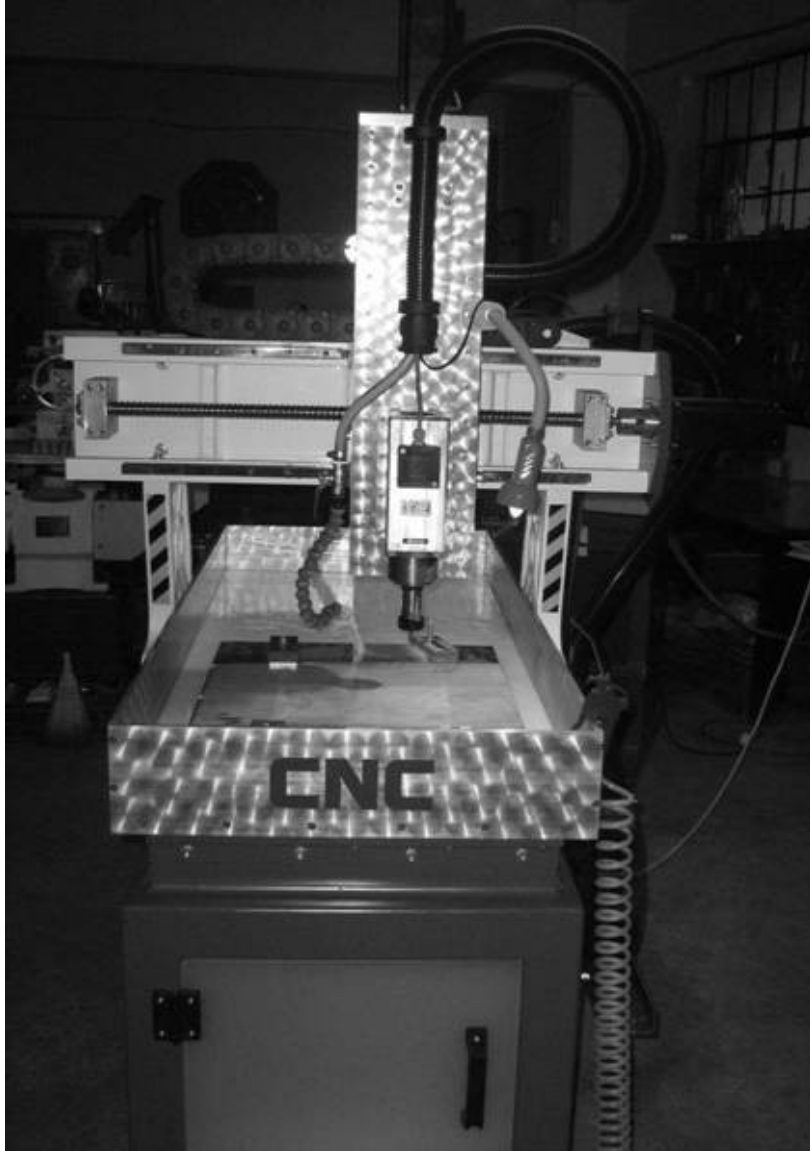


Resim 2.20 Al 6061 malzemenin işlenmiş yüzeye ait SEM fotoğrafı (Wang, Gong, Abba, Chen, Shi and Cai, 2007).

3. MATERİYAL VE METOD

3.1 CNC Takım Tezgâhı İmalatı

Deneysel çalışmada ve laboratuvar uygulamalarında kullanılmak üzere uygun üç eksenli CNC freze tezgâhı tasarlanmış ve imal edilmiştir (Resim 3.1). Tezgahın tasarımı yapıldıktan sonra elektronik ve bilgisayar aksamı Bursa Marel Makine’de, mekanik aksamı ise İstanbul Çağlar Makine’de hizmet alımı şeklinde yaptırılmıştır.



Resim 3.1 İmalatı yapılan CNC tezgâhı.

İmalatı yapılan tezgahın genişliği 90 cm, uzunluğu 140 cm ve Z eksen yatakları açılmış durumda iken yüksekliği 210 cm gelmektedir. Tabla işleme kapasitesi, X ekseninde 50 cm, Y ekseninde 50 cm ve Z ekseninde 30 cm olarak tasarlanmıştır. Soğutma, sıvı solüsyon ile gerçekleştirilmektedir. Kızaklara elle yağlama yapılmaktadır ve geri tutma torku step motorlar ile sağlanmaktadır. Ayrıca Y eksen hareket mekanizmasında çift step motor kullanılmıştır.

3.1.1 Step Motor ve Sürücü Devresi

Tezgahın imalatında her üç eksen kontrolü içinde step motor kullanılmıştır (Resim 3.2). Step motorlar dönme hareketindeki adım ve yön sinyallerini dönüştürler ve basit bir şekilde kontrol edilebilirler. Her ne kadar step motorlar, dijital geri besleme sinyalleri ile ya da analog sinyal kombinasyonları ile kullanılsa da, çoğunlukla geri bildirim (açık uçlu) dışında kullanılanları da vardır. Step motorların kontrolü için sürücü veya kontrol kartı gereklidir (Kutlu, 2006).



Resim 3.2 Tezgâhın eksen hareketlerinde kullanılan bipolar step motor.

Aşağıdaki sebeplerden dolayı tezgâh uygulamasında step motor kullanılmıştır.

- Maksimum dinamik dönme momenti, düşük hızlarda en yüksek değerine ulaşır.
- Step motorlar kolaylıkla ivmelenebilirler, rijitliğe ve sabit bir dönme momentine sahiptirler, bu yüzden genellikle fren ve kavramalara gerek duyulmaz.
- Step motorlar üretim yapıları itibariyle dijitaldirler. Pozisyon belirleyici adımların sayısı, hız belirleyici frekans adımlarının sayısı ile aynıdır.

- Çok pahalı değil, kolay kontrol edilebilir ve yapısında fırça olmamasından dolayı ısı kaybına uğramazlar (Kutlu, 2006).

CNC’ de kullanılan step motorların teknik özellikleri Çizelge 3.1’de belirtilmiştir.

Çizelge 3.1 Step motorun teknik özellikleri.

Faz Sayısı	2 faz (Bipolar)
Adım Açısı	1,8° /STEP
Çalışma Akımı	4,5 A/PHASE
Detent Torque (Yüksüz ve Enerjisiz Tutma Torku)	2 N cm
Holding Torque (Yüksüz ve Enerjili Tutma Torku)	4,5 N cm

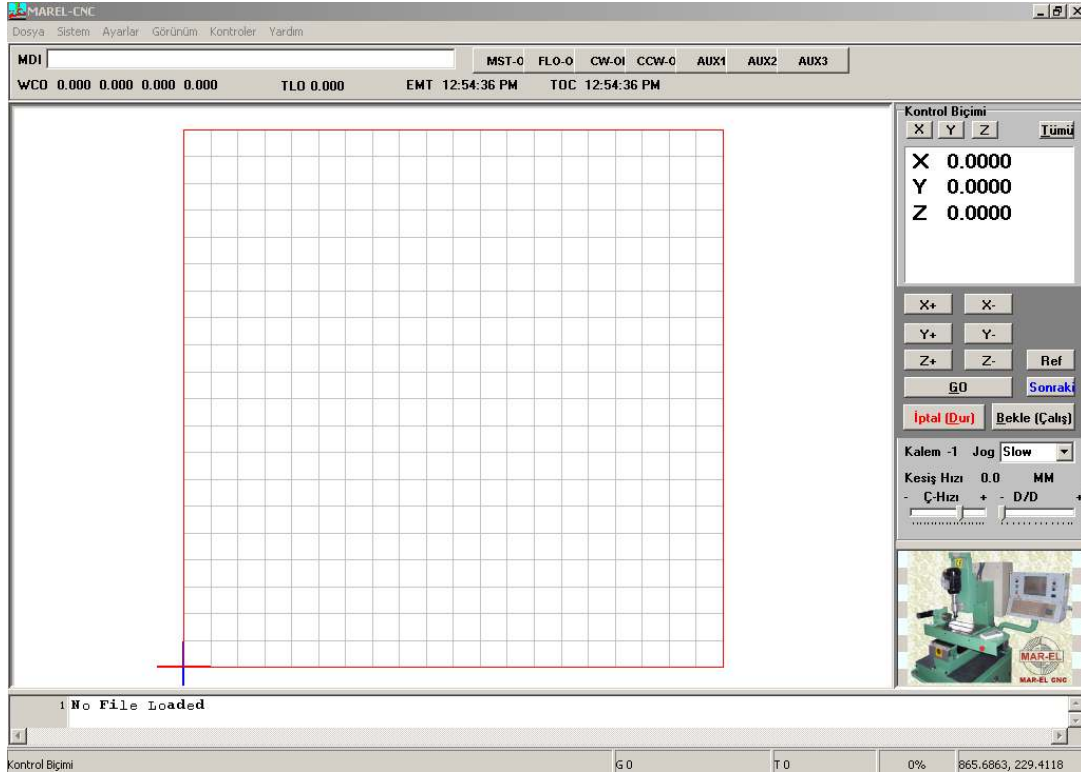
Üç eksen CNC’ de step motor sürücüsü sayesinde çok yüksek hassasiyetlerde step motorlar kontrol edilebilir. CNC’ de kullanılan step motor sürücüsünün teknik özellikleri aşağıda verilmiştir.

- İki fazlı, mikro step özellikli.
- 2,5~6A çıkış faz akımı.
- 200 Adım–25600(1/128adım) adıma kadar set edilebilme.
- 220 V AC PWM metodu ile step motoru yüksek gerilimlerde çalıştırılabilme.
- Maksimum giriş pals frekansı 150 KHz.
- 6~20 mA kontrol giriş akımı.
- -10 °C +45 °C çalışma sıcaklığı.

3.1.2 Kullanılan Ara Yüz Programı

Marel CNC programı kontroller kartı ile beraber alınmıştır. Program bilgisayarda çizimi yapılan teknik resmin veya herhangi bir çizimin, operatörün istekleri doğrultusunda G

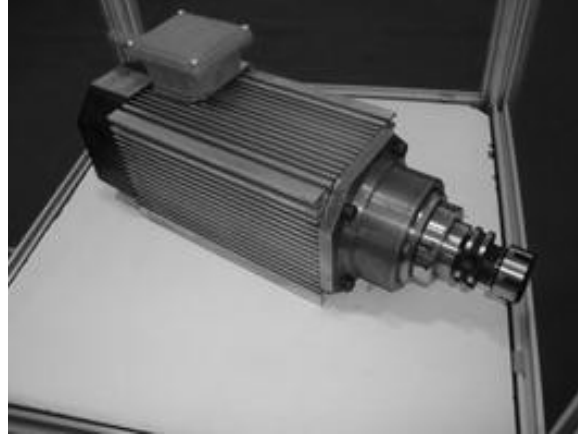
kod sistemini oluşturmaktadır. Oluşturulan programlar Marel CNC programı yardımıyla bilgisayarların seri haberleşme portları kullanılarak, kontrollerdeki seri haberleşme portuna gönderilir. Bu programları yorumlayan kontroller sistemi harekete geçirerek makinenin çalışmasını sağlar. Marel CNC programı kullanımı kolay bir ara yüz programıdır. Program dilinin Türkçe olması ise, programın öğrenilmesini oldukça kolaylaştırmaktadır (Resim 3.3).



Resim 3. 3 Kullanılan arayüz programı

3.1.3 Spindle Motor

CNC tezgahında Resim 3.4'te resmi ve Çizelge 3.2'de özellikleri verilen spindle motor kullanılmıştır. Mikro frezeleme işlemlerinde genellikle maksimum 1 mm çapında kesici takımlar kullanıldığından, motor gücü ve ona karşılık gelen tork değeri yeterlidir. Tezgâh daha öce yapılmış olan bir çalışmada (Samancıoğlu, 2010) kullanılarak, kaldırdığı minimum ve maksimum talaş derinlikleri test edilmiştir.



Resim 3.4 Spindle motor.

Çizelge 3.2 Spindle motorun teknik özellikleri.

Dış Ölçü	90 mm x115 mm
Ağırlık	8,6 Kg
Frekans (Hz)	300
Gücü	2,2 Kw/3 Hp
Gerilim	220/380 V
Akım	8/4,6 A
Devir	Max. 18000 dev/dak

3.1.4 Bilyeli Vidalar ve Lineer Kaymalı Yataklar

Klasik tezgâhların hareket unsurlarında var olan boşluk miktarı, CNC tezgâhlarında kullanılan bilyeli vida somun sistemleri ve lineer kaymalı yataklar kullanılarak giderilir. Bilyeli vida, bir yatak içindeki kanallarda sürekli devir-daim edecek şekilde dizilmiş bilyelerin bir mil üzerinde, bilye profiline uygun şekilde açılmış kanallarda hareket etmesiyle oluşan sisteme denir. Bu çalışmada CNC tezgâhında GTEN marka 5 mm adımlı ve 20 mm dış üstü çapı olan hassas bilyeli vidalı miller kullanılmıştır (Resim3.5).



Resim 3.5 Hassas bilyeli mil ve somunu.

Lineer yataklar en çok hassasiyet isteyen hareket uygulamalarında kullanılırlar. Bu tür yataklar üzerlerine gelen yükleri eşit olarak dağıtarak desteklemekle beraber bir ray boyunca ileri geri hareket edebilirler. Bu çalışma kapsamında tasarlanıp imal edilen tezgâhın spindle motoru taşıyan aksamın lineer hareketi için Schneeberger raylı sistemler kullanılmıştır (Resim 3.6).

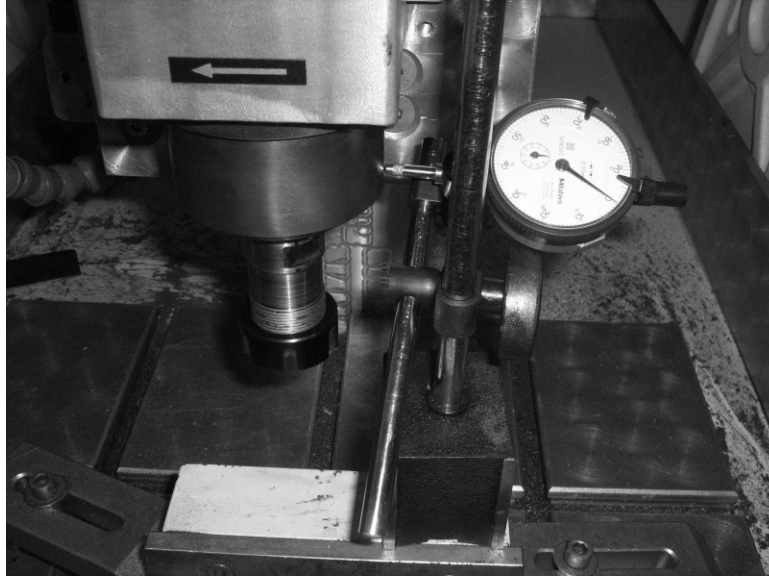


Resim 3.6 Doğrusal kaymalı yatak.

3.1.5 Makine Gövdesi

Tezgâh gövdesinin rijitlik / kütle oranı yüksek olması mikro frezeleme için önemli bir faktördür. Bu nedenle malzeme seçiminde sönümlenme özelliği de dikkate alınmıştır.

Tezgâh gövdesi çelik döküm olarak tasarlanmış ve imal edilmiştir. Tasarım aşamasında Köprü tipi CNC Freze Tezgâhı konstrüksiyonu tercih edilmiştir. Bu konstrüksiyonda X eksen ve Z eksen aynı sütun üzerinde hareket etmekte ve Y eksen bu iki eksenle bağımsız hareket etmektedir. Tezgâh tablası Alüminyum döküm tercih edilmiş ve paralellik sağlaması için tezgâh üzerinde işlenmiştir. Tezgâhın tekrarlanabilirlik hassasiyeti komparatörle ölçülmüş ve 5 µm olarak tespit edilmiştir (Resim 3.7).



Resim 3.7 Tekrarlanabilirlik hassasiyeti ölçümü.

3.2 Deneylerde Kullanılan Kesici Takım ve Malzemeler

Kullanılan kesici takım standart ölçüleri Çizelge 3.3'te verilmiştir. Ayrıca kesici takımlara ait bir fotoğrafta Şekil 3.1'de verilmiştir. Kesici helis açısı 30°, ön boşluk açısı pozitif verilerek üretilmiştir. Deneyde 800 µm çapında, kaplamasız WC mikro freze takımı, TiN Kaplamalı mikro freze takımı ve AlTiN kaplamalı mikro freze takımı kesici olarak kullanılmıştır. Aşınma deneyinde ayrıca ikinci bir kesici takım kullanılmıştır. Bu kesici takımın arka boşluk açısı birinci takıma göre daha azdır. Üretici firma tarafından verilen standart diş başına ilerleme hızı 0,007~0,010 mm, kesme hızları ise 20 HRC ve daha yumuşak malzemeler için 50~100 m/dak verilmiştir.



Şekil 3.1 Kesme işlemlerinde kullanılan mikro freze kesici takım.

Çizelge 3.3 Mikro freze kesici takıma ait geometrik boyutlar.

ØD	Ødn	l	ll	L	Ød
(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
0,8	0,75	1	4	38	4

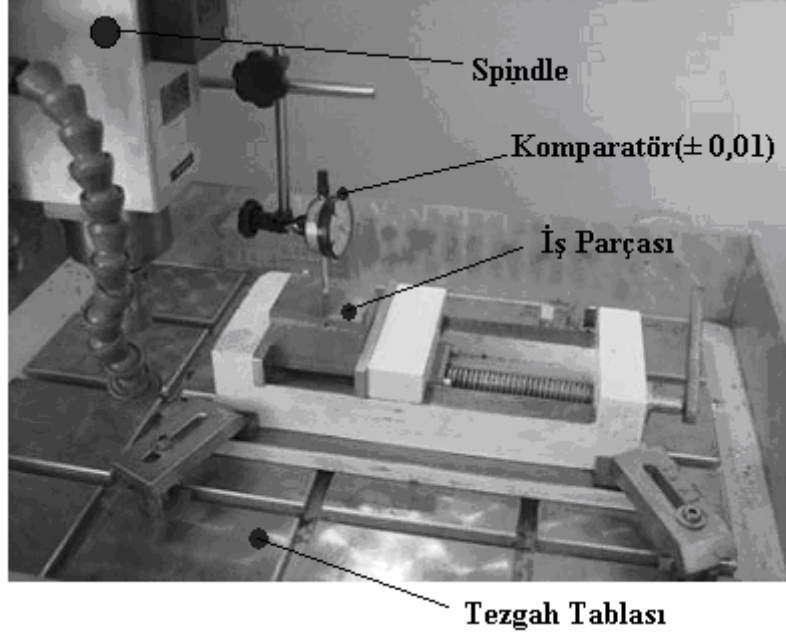
Kesme deneylerinde AISI 1045 olarak isimlendirilen ve sıkça kullanılan karbon çeliği tercih edilmiştir. Sanayide taşıt, makine, motor, aparat, aktarma organı mili ve dişlisi gibi yüksek zorlanmalı parçaların yapımında sıkça kullanılmaktadır. Malzemenin yaygın kullanım alanı tercih sebeplerinden birisidir. Ayrıca literatür araştırmasında elde edilen bilgiler ışığında içyapıdaki homojenliği sayesinde elde edilen değerler diğer malzeme türlerine göre kıyasla daha güvenilirlerdir. AISI 1045 malzemeye ait kimyasal bileşim Çizelge 3.4’te verilmiştir.

Çizelge 3.4 AISI 1045 malzemenin kimyasal bileşimi.

C	Si	Mn	P _{max}	S _{max}
0,43–0,5	0,15–0,35	0,6–0,9	0,04	0,05

Mikro frezelemede kaldırılan talaş derinliği çok küçük miktarlarda olduğu için iş parçasının oldukça hassas bağlanması önem kazanmaktadır. İş parçasının dik olmadığı durumlarda talaş derinliği değişken olacaktır. Bunun sonucunda takım aşınması da

farklı bir seyir izleyecektir. Bu noktadan hareketle prizmatik AISI 1045 malzeme hassas olarak taşlanmış ve tezgâh üzerine komparatör yardımı ile paralel bir düzlem boyunca bağlanmıştır (Resim 3.8).



Resim 3.8 İş parçasının bağlanması ve kontrolü.

3.3 Kesme Parametreleri

Yüzey pürüzlülüğünün ölçülmesi üç aşamalı olarak gerçekleştirilmiştir. Her üç takım da kesme hızı 48 m/dak, iş mili devri dakikada 18000 olarak alınmıştır. Birinci aşamada WC 0,8 mm kesici uç ile Çizelge 3.5’de verilen parametrelerde tam faktöriyel deneyler yapılmıştır. İkinci ve üçüncü aşamada TiN ve AlTiN kaplamalı kesicilerle de aynı parametreler kullanılarak kesme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Yüzey pürüzlülüğünün ölçülmesinde, her bir kesme parametresi için (Çizelge 3.5) 1,6 mm genişliğinde ve 15 mm boyunda kanallar açılarak ve Ra ölçümleri bu kanallar üzerinden yapılmıştır. Aşınma deneyleri 0,175 mm talaş derinliğinde, 48 m/dak kesme hızında ve 75 mm/dak sabit ilerleme hızında gerçekleştirilmiştir. Deney her takım için 5 aşamalı olarak gerçekleştirilmiştir. Her kesici takım ile 1,12 mm³ talaş kaldırılmış ve sonrasında takım aşınması USB mikroskop yardımı ile ölçülmüştür.

Çizelge 3.5 Yüzey pürüzlülüğü deneylerinde kullanılan kesme parametreleri.

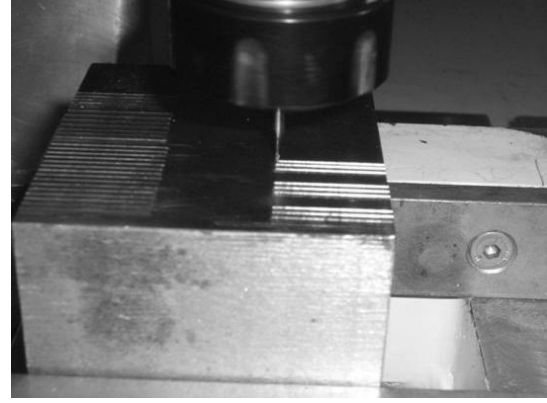
Talaş derinliği (mm)	İlerleme Değeri (mm/dak)				
0,10	75	125	200	250	300
0,15					
0,20					

3.4 Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümü

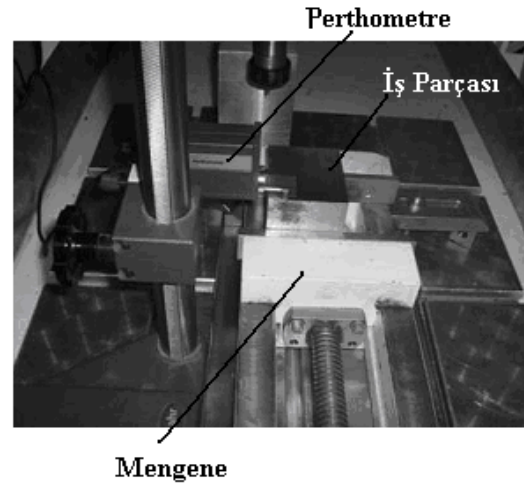
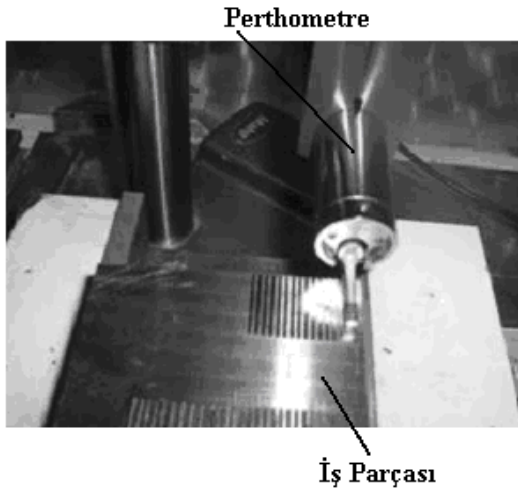
İmalat sürecinde iş parçasının yüzey pürüzlülüğü büyük rol oynamaktadır. Geleneksel imalat sürecinde üretimi yapılan parçalarda yüzey pürüzlülüğü, özel cihazlarla veya el yordamıyla tespit edilebilmektedir. Mikro frezelemede ise üretilen ürün boyutu önemli oranda düşmekle beraber, Ra değerleri aynı oranda düşüş göstermektedir. Geleneksel imalatta üretimi yapılan kalıplarda istenilen yüzey pürüzlülüğüne ulaşmak istendiğinde makineler haricinde el yordamıyla dahi yüzey parlatma işlemi gerçekleştirilmektedir. İmal edilen parçanın boyutlarına oranla ortalama yüzey pürüzlülük (Ra) değeri çok düşüktür. Bu nedenle prizmatik mikro frezeleme alanında önceden yapılan işlemlerden elde edilen yüzey değerleri büyük önem taşımaktadır.

Yapılan bütün kesme işlemleri aynı oda sıcaklığında ve parça hiç sökülmeden gerçekleştirilmiştir. Çalışmada yapılan deneyler sonucunda pürüzlülük değerlerini ölçmede “MAHR-PERTHOMOTER M2” marka yüzey pürüzlülük cihazı kullanılmıştır. Cihaz, işleme yapılmış yüzeyde küçük bir kafa içerisine yerleştirilmiş kızaklı elmas iğne ucu yardımı ile ölçüm yapmaktadır.

Her parametre için tasarlandığı gibi 1,6 mm genişliğinde ve 15 mm uzunluğunda kanallar (Resim 3.9) açılmış ve perthometre kanallara paralel olacak şekilde ayarlanarak yüzey pürüzlülüğü ölçülmüştür (Resim 3.9).



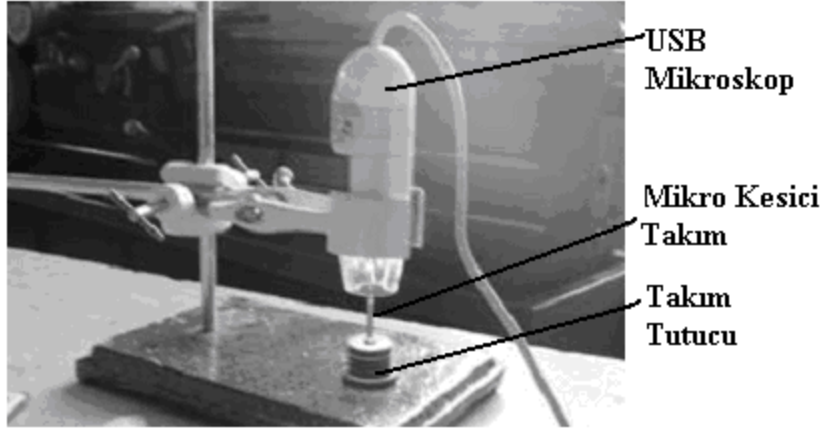
Resim 3.9 Deney parçası üzerine açılan kanallar



Resim 3.10 Yüzey pürüzlülüğünün tezgah üzerinde ölçülmesi.

3.5 Takım Aşınmasının Ölçümü

Aşınma deneyleri sabit parametreler kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Her 160 mm'lik kesme boyu sonrasında takım çıkartılmış ve dijital mikroskop ile aşınma miktarı ölçülmüştür (Resim 3.11). Dino-Lite AM-211 maksimum 200x büyütme olanağına sahip USB mikroskop kullanılarak, resimler çekilmiştir. USB mikroskoptan alınan görüntüler yine mikroskoba ait bir yazılım kullanılarak bilgisayara aktarılmıştır. Çekilen resimler Autocad programında incelenerek ölçülendirilmiş ve aşınma miktarları tespit edilmiştir.



Resim 3.11 Mikro kesici takımda meydana gelen aşınmanın ölçülmesi.

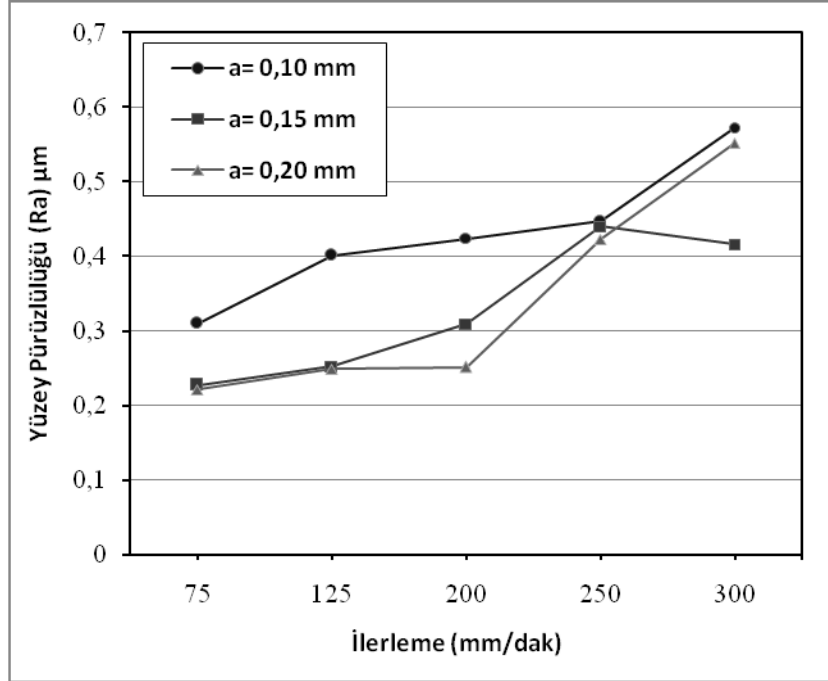
4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1 Kesme Parametrelerine Bağlı Yüzey Pürüzlülük Değerleri

Yapılan kesme deneylerinde kesme hızı ve kesme hızına karşılık gelen devir sayısı sabit alınmıştır. Ortalama yüzey pürüzlülüğünü (R_a) en çok etkileyebilecek olan ilerleme ve talaş derinliği için farklı değerler alınarak deneyler gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar üç farklı değişken (kaplama türü, talaş derinliği ve ilerleme) için değerlendirilmiştir. Sonuçlar takım bazında ve talaş derinliği bazında olmak üzere iki kategoride incelenmiştir.

4.1.1 İlerlemenin Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi

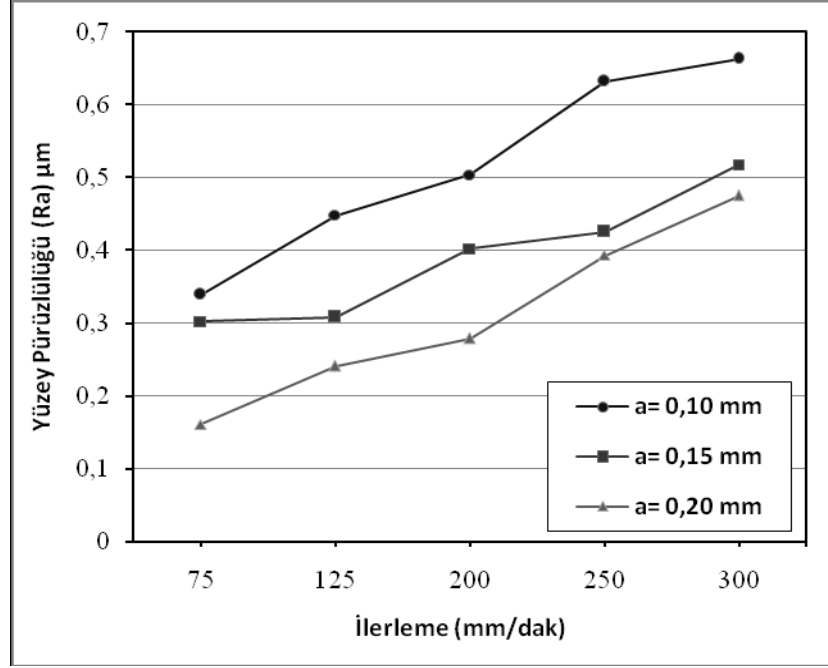
Şekil 4.1’de kaplamasız kesici takım için elde edilen yüzey pürüzlülük değerleri verilmiştir. Grafikte ilk dikkati çeken unsur, artan ilerleme değerine bağlı olarak yüzey pürüzlülük değeri artmaktadır. Artan ilerleme ile birlikte birim zamanda bir kesici ağıza düşen talaş kesiti miktarı artmaktadır. Buda yüzey kalitesinin bozulmasına neden olmaktadır. Şekil 4.1’de ilginç olabilecek bir sonuç ise, azalan talaş derinliği ile birlikte yüzey pürüzlülük değerinin artmasıdır. Konvensiyonel talaş kaldırma işlemlerinde, bitirme talaşı olarak adlandırılan finiş pasolarda, yüzey kalitesi tatmin edici düzeydedir. Oysa Şekil 4.1, 4.2 ve 4.3’te görüldüğü üzere mikro frezelemede tam tersi bir durum ortaya çıkmaktadır. Bunun altında yatan neden ise kritik talaş derinliğidir. Mikro frezelemede, kritik talaş derinliğine yakın ve bu derinliğin altında yapılan kesme işlemlerinde takım kesme yapmak yerine iş parçası yüzeyinde kazıma etkisi yapar. Bu da işlenen parçanın yüzey kalitesini bozmakla kalmaz, aynı zamanda takım dinamiğini ve kesme kuvvetlerini olumsuz etkiler.



Şekil 4.1 Kaplamasız karbür kesici takım için ilerleme ve talaş derinliğine bağlı yüzey pürüzlülüğünün değişimi.

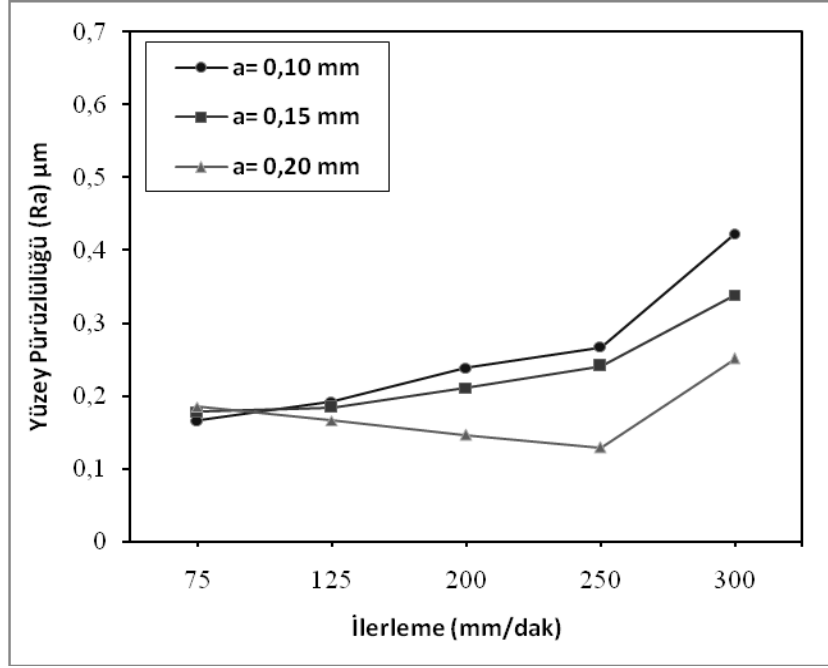
Şekil 4.2’de TiN kaplamalı mikro kesici takım için elde edilen yüzey pürüzlülük değerlerinin ilerleme ve talaş derinliğine bağlı olarak değişimi verilmektedir. TiN kaplamalı takımda talaş derinliği etkisini daha net görmek mümkün olmaktadır. Özellikle Şekil 4.1 ile karşılaştırıldığında 0,1 ile 0,2 mm talaş derinlikleri arasındaki fark oldukça dikkat çekicidir. Buna ilave olarak Şekil 4.2’de $a=0,1$ mm için elde edilen yüzey pürüzlülük değerleri kaplamasız takıma nazaran bir miktar daha yüksektir. Fakat yüksek ilerleme değerlerinde ($f \geq 200$ mm/dak) TiN kaplamalı kesici takımda elde edilen yüzey pürüzlülük değerleri kaplamasız takıma nazaran daha düşüktür. TiN kaplamalı takım için en iyi sonuçlar 0,20 mm talaş derinliğinde alınmıştır. Düşük talaş derinliklerinde takımın daha rahat kesme işlemini gerçekleştiriyor olmasına karşın talaşın küçük olması nedeni ile daha çabuk ısındığı düşünülüyor. Bu nedenle ısınma neticesinde takıma ve iş parçasına sıvanarak yüzey kalitesini bozduğu tahmin ediliyor. Çıkan yüzey kalitelerinden anlaşıldığı üzere 0,8 mm çaplı freze ucu için minimum talaş derinliği 0,20 mm diyebiliriz. Diğer talaş derinliklerinde talaşın tam formunu oluşturamayıp bir kısım talaşın plastik deformasyon neticesinde yüzeyde kaldığı tahmin

edilmektedir. Deformasyona uğrayan malzemenin yüzey pürüzlülüğünü olumsuz yönde etkilediği görülmektedir.



Şekil 4.2 TiN kaplamalı kesici takım için ilerleme ve talaş derinliğine bağlı yüzey pürüzlülüğünün değişimi.

AlTiN kaplamalı kesici takımda elde edilen Ra değerlerinin talaş derinliği ve ilerlemeye bağlı değişimi Şekil 4.3'te verilmektedir. Düşük ilerleme değerlerinde ($f \leq 250$ mm/dak) talaş derinliğinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisi yok denecek kadar az çıkmıştır. Sadece $a=0,2$ mm talaş derinliğinde elde edilen yüzey pürüzlülük değerleri diğer iki talaş derinliğine göre daha düşüktür. AlTiN kaplamalı kesici takımda farklı olan bir durum ise, 0,2 mm talaş derinliğinde ilerlemenin artması ile yüzey pürüzlülük değeri azalmaktadır. Bununla birlikte TiN Kaplamalı kesici takımda 0,1 mm ile 0,15 mm arasında iki önemli fark burada göze çarpmaktadır. AlTiN kaplamalı kesici takım için $f \leq 125$ mm/dak değerlerinde kaldırılan talaş derinliğinin yüzey pürüzlülüğü açısından çok önemli olmadığını söylemek mümkündür. AlTiN kaplamalı kesici uç için 0,10 mm talaş derinliğinde çıkan yüzey kalitesine bakılarak minimum talaş derinliğini burası olduğu söylenebilir. Ancak daha düşük talaş derinliklerini kesme kuvvetleri ile birlikte test etmek gerekmektedir.

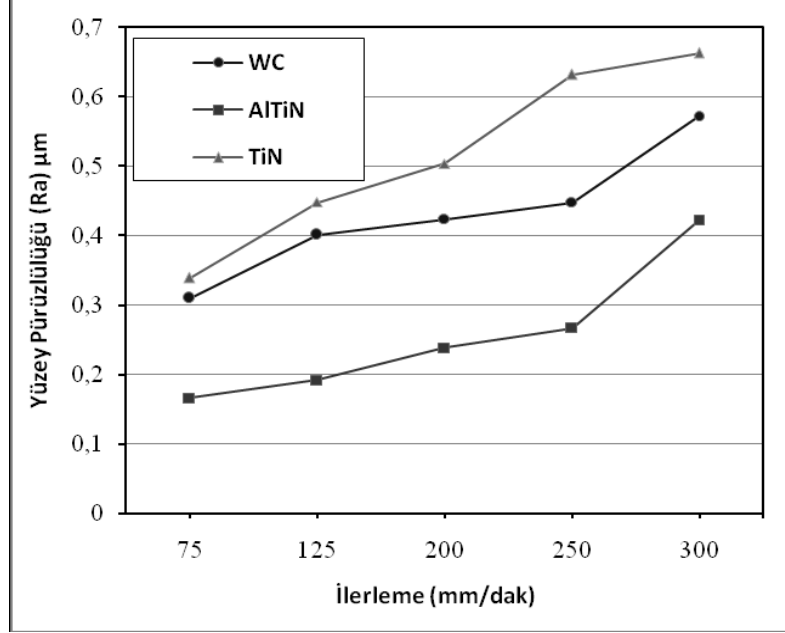


Şekil 4.3 ALTİN kaplamalı kesici takım için ilerleme ve talaş derinliğine bağlı yüzey pürüzlülüğünün değişimi.

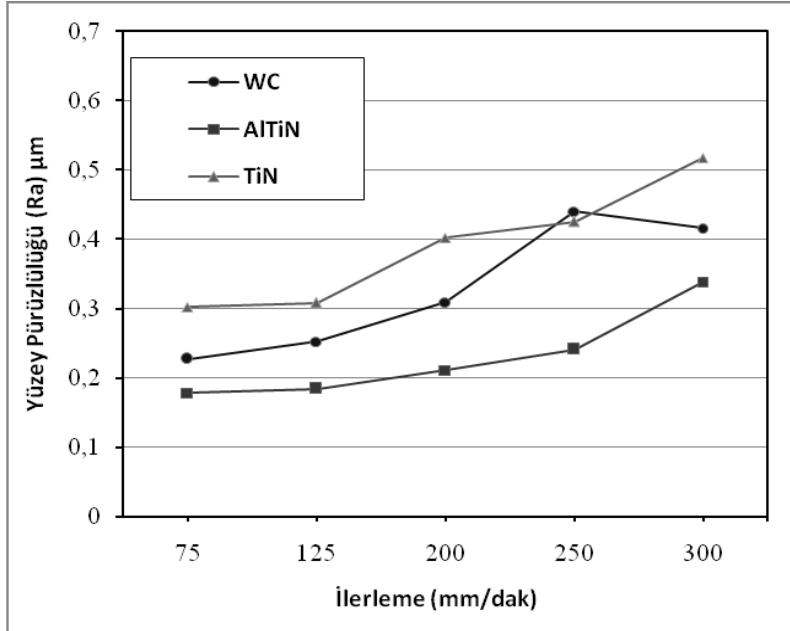
4.1.2 Talaş Derinliğinin Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi

Şekil 4.4'te 0,1 mm talaş derinliğinde her bir kesici takım için elde edilen yüzey pürüzlülük değerlerinin ilerleme hızına bağlı değişimi verilmiştir. Grafikte dikkati çeken ilk unsur, ALTİN kaplamalı takımda elde edilen yüzey pürüzlülük değerinin diğer takımlara nazaran daha düşük olduğudur. Şekil 4.6'da 0,20 mm talaş derinliğinde ve düşük ilerleme hızlarında takımların performanslarında aşırı bir fark olmadığı gözlemlenmiştir. Ancak Şekil 4.4'te 0,10 mm talaş derinliğinde pürüzlülüğün iki kat arttığı görülmektedir. Şekil 4.5 göz önüne alındığında genel olarak TiN kaplamanın yüksek hızlarda dezavantaj olduğu söylenebilir. Kaplamasız takıma nazaran TiN kaplamalı takım için elde edilen yüzey pürüzlülük değerleri daha yüksek olduğu Şekil 4.4'den görülmektedir. Fakat artan talaş derinliği ile birlikte kaplamasız kesici takım ve TiN kaplamalı kesici takım arasındaki fark azalmaktadır (Şekil 4.5, Şekil 4.6). Özellikle talaş derinliği 0,2 mm için yapılan kesme işlemlerinde TiN kaplamalı kesici için elde edilen yüzey pürüzlülük değerlerinin daha düşük olduğu söylenebilir. Bunun temel nedeni olarak kritik talaş derinliği söylenebilir. Çünkü kaplamasız kesici takım ile TiN

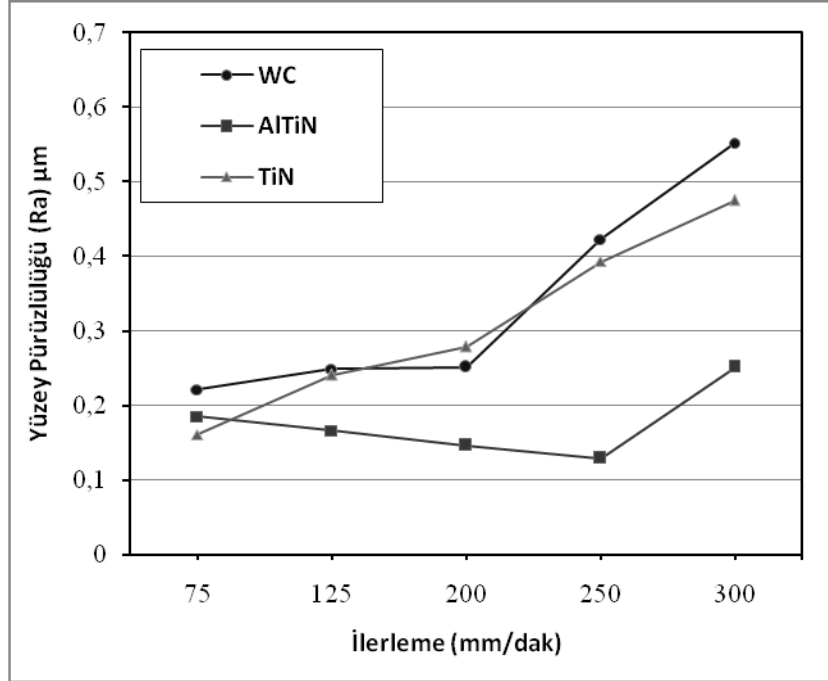
kaplamalı kesici takımın sürtünme katsayıları farklıdır. Azalan talaş derinliği ile birlikte takım talaş ara yüzündeki sürtünme katsayısı da talaşın oluşumu da değişecektir.



Şekil 4.4 $a=0,10$ mm için talaş derinliği için yüzey pürüzlülüğünün ilerlemeye ve takım türüne bağlı değişimi.



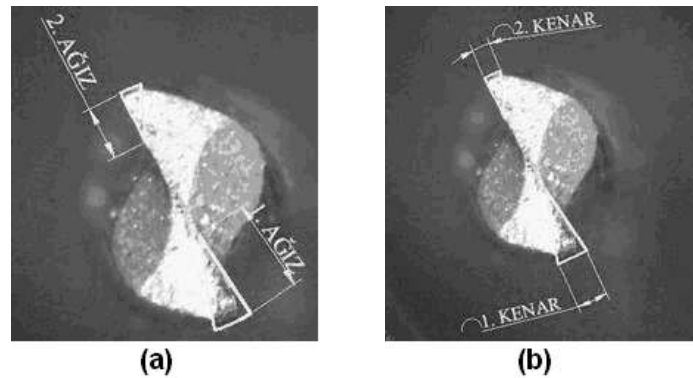
Şekil 4.5 $a=0,15$ mm için talaş derinliği için yüzey pürüzlülüğünün ilerlemeye ve takım türüne bağlı değişimi.



Şekil 4.6 $a=0,10$ mm için talaş derinliği için yüzey pürüzlülüğünün ilerlemeye ve takım türüne bağlı değişimi.

4.2 Takım Aşınması

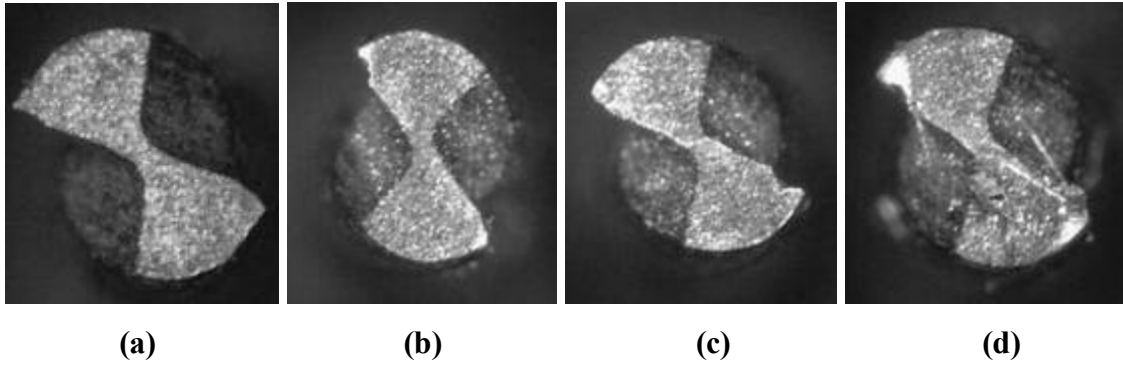
Mikro kesici uçlar ile yapılan aşınma deneyleri sonucunda kesici ağız ve kenarlarında meydana gelen aşınmaların farklılık gösterdiği tespit edilmiştir. Bu nedenle aşınma sonuçları analiz edilmek üzere Şekil 4.7’de görüldüğü gibi takım bazında 1–2. kesici ağız (a) ve 1–2. kesici kenar (b) şeklinde değerlendirilmiştir.



Şekil 4.7 Kaplamasız kesici uç aşınmaları, (a) Kesici ağız ve (b) Kesici kenar.

Zhu et al. yaptıkları araştırmada elde ettikleri sonuçlarda kesici takım bazında, ağızlardaki aşınmaların farklı ölçüde olduğunu tespit etmişlerdir. Kaplamaların takım ömrünü uzattığı ve talaşın oluşumu sırasında kayma etkisi ve böylece talaşın uzaklaşmasına yardımcı olduğu biliniyor. Ancak kesme şartlarının uygun olmadığı durumlarda kaplamanın daha çabuk deforme olduğu ve aksine aşınmanın daha çabuk gerçekleşeceği de bilinmektedir.

Resim 4.1-a'da kesici ucun ilk hali görülmektedir. 3,36 mm³ talaş kaldırdıktan sonra takımdaki aşınma normal seyrinde gitmektedir (Resim 4.1-b). Ancak bir sonraki aşamada kesici ağızda küçük çaplı kırılmalar meydana geldiği görülmektedir (Resim 4.1-c). Ve en son aşamada 5,6 mm³ talaş kaldırdıktan sonra kesici uç ağızındaki kırık kısmın büyüdüğü ve buna paralel olarak aşınmanın da birden arttığı tespit edilmiştir.

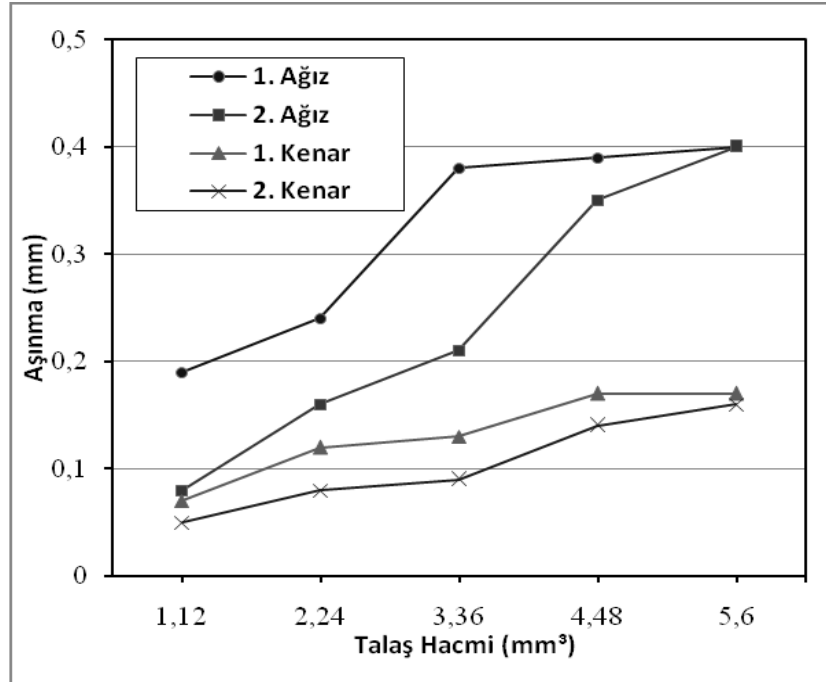


Resim 4.1 AlTiN kaplamalı ikinci takımda meydana gelen aşınma ve kesici kenar kırılmaları

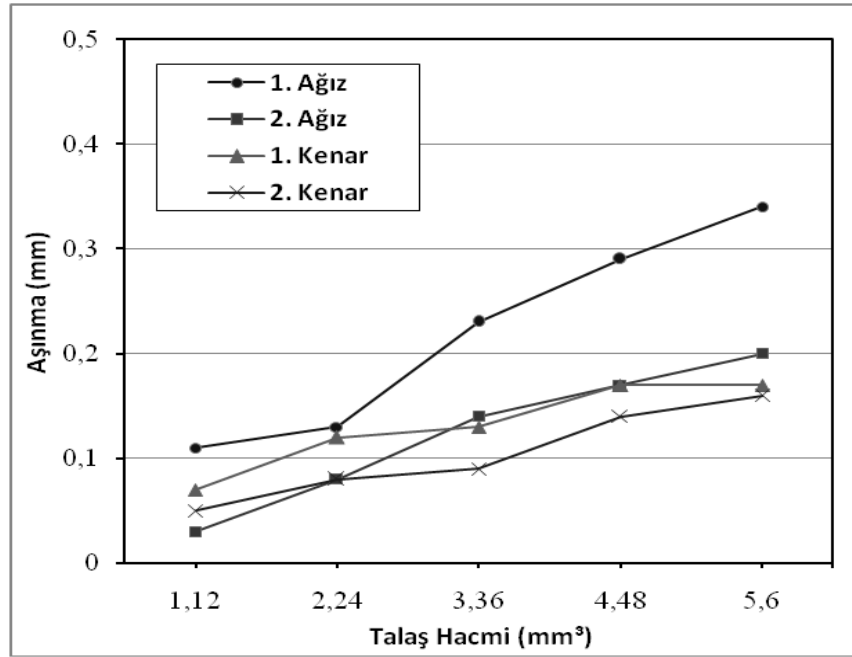
4.2.1 Takım Bazında Aşınma Ölçüm Sonuçları

Şekil 4.8, 4.9, 4.10'da takım bazında kesici ağız ve kenar aşınması sonuçları verilmiştir. Kesici uç ve helis geometrileri aynı olan mikro kesici takımlarda kenar ve ağız aşınmaları farklılık göstermişlerdir. Ancak arka boşluk açısı daha az olan AlTiN kaplamalı freze ucunda iki kenar aşınması birlikte gerçekleşmiştir. Mikro kesiciler ile yapılan deneylerde tüm takım türlerinde aşınma geleneksel frezeleme yöntemine nazaran çok çabuk oluşmuştur. Zhu (2009) et al. araştırmalarında yapmış oldukları deneyde 240 saniye gibi küçük bir zaman diliminde büyük bir aşınma meydana

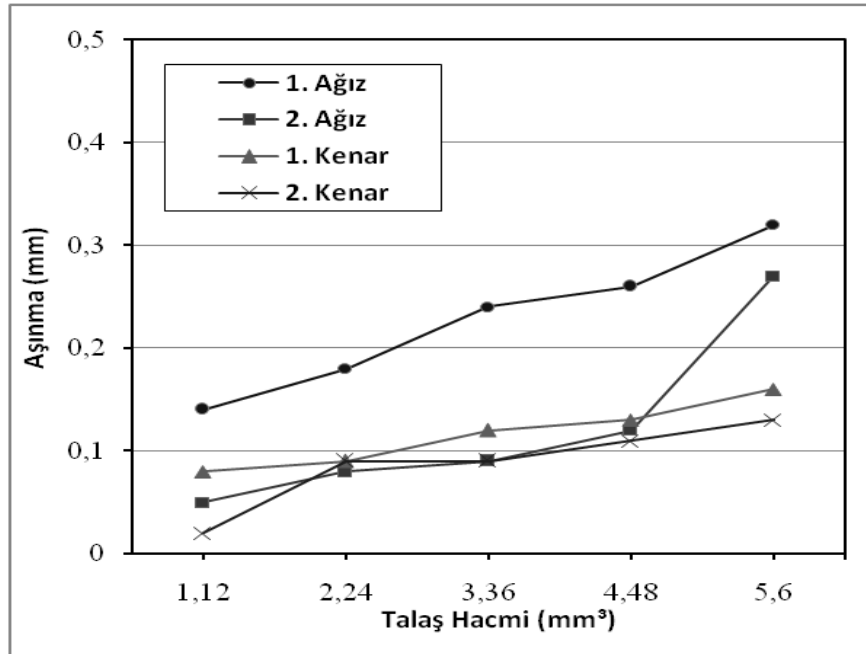
gelmiştir. Aşınmanın sebebi mikro frezeleme parametrelerin karmaşık yapısından ileri gelmektedir. Kesici kenar ve ağız aşınmasının birlikte olmamasının çeşitli nedenleri olabilmektedir. Öncelikli olarak takımın imalatından kaynaklanabilecek bazı geometrik sorunlar olduğu düşünülmektedir. Şekil 4.8’de kaplamasız mikro kesici ucunda ağız ve kenar aşınmaları birbirinden çok farklı oranlarda oluşmuştur. Kenar aşınmalarında aşınmaların aynı oranda büyüdüğü, ancak kenar aşınmaları farklı şekilde oluşmuştur. Aşınma 3,36 mm³ talaştan sonra çoğalmaya başlamış ve 4,48 mm³ oranında 1. ağzın aşınması son noktaya gelmiştir. Bu noktadan sonra yük 2. ağzın üstüne binmiş ve takım ömrü bitirmeye doğru hızlı bir çıkış yapmıştır. Şekil 4.9’da TiN kaplamalı takımda kenar aşınması birlikte gerçekleşirken, kesici ağız aşınması birbirinden farklı oluşmuştur. Aşınmanın başlangıçta aynı olduğu ancak sonraki aşamalarda 1. ağızdaki aşınmanın hızlı bir şekilde köreldiği tespit edilmiştir. Şekil 4.10’da AlTiN kaplamalı takımda da aşınma, TiN kaplamalı takıma benzer şekilde oluşmuştur. Ancak son talaş kaldırma aşamasında 2. kesici ağzın aşındığı görülmektedir.



Şekil 4.8 Farklı ağız ve kenar sayılarına bağlı olarak takım aşınması (WC).



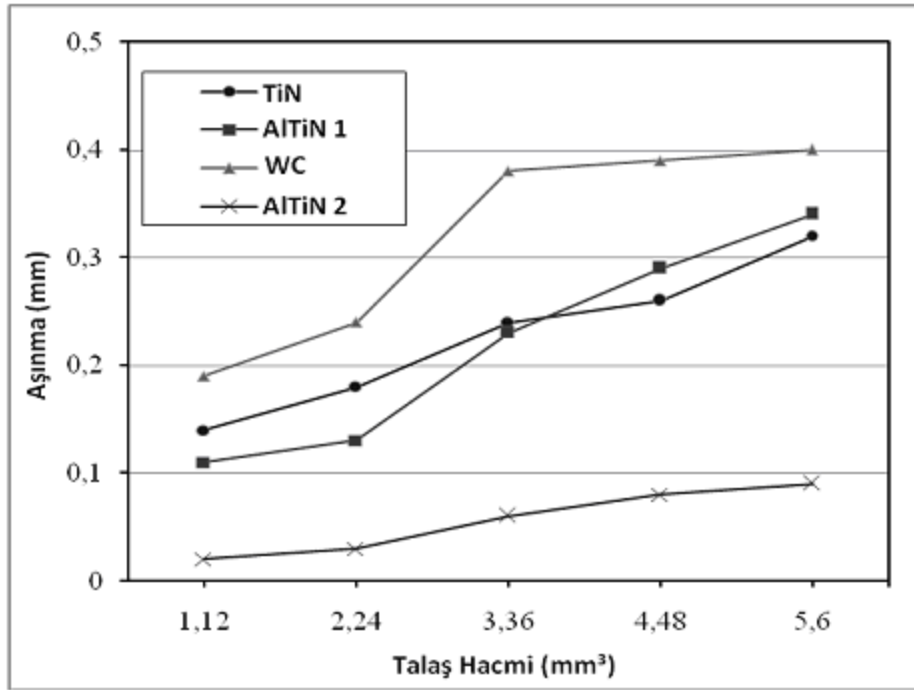
Şekil 4.9 TiN kaplamalı freze ucu kesici ağız ve kenar aşınması sonuçları.



Şekil 4.10 AlTiN kaplamalı freze ucu kesici ağız ve kenar aşınması sonuçları.

4.2.2.Genel Kesici Ağız ve Kenar Aşınması Sonuçları

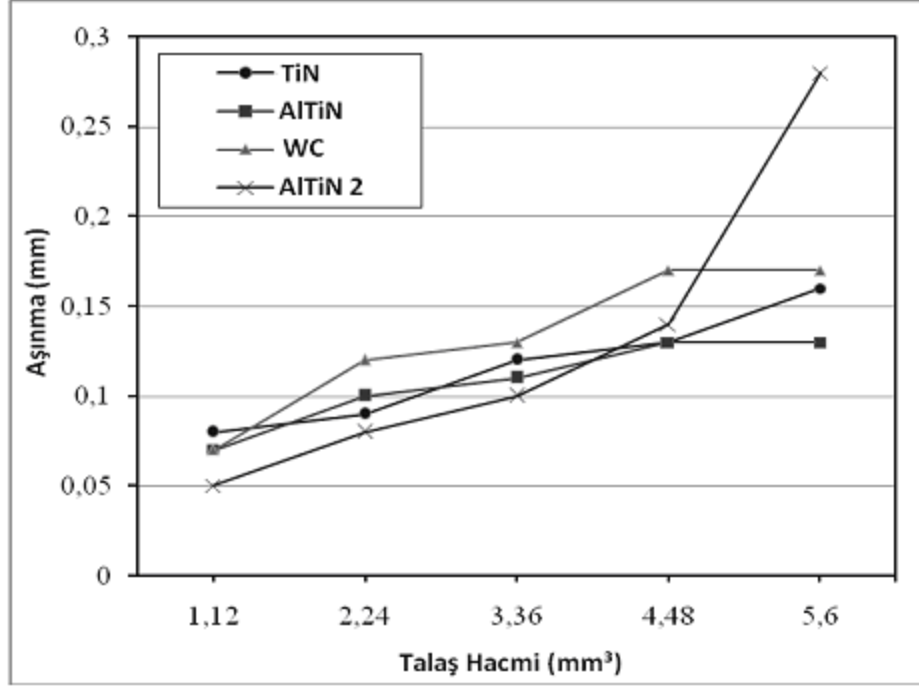
Takımların kesici ağız aşınması performansları Şekil 4.11’de verilmiştir. En iyi aşınma sonuçları AlTiN kaplamalı ikinci freze ucunda alınmıştır. Ancak geometrileri aynı olan takımlar arasında değerlendirme yapıldığında karmaşık bir tablo karşımıza çıkmaktadır. Başlangıçtan 3,36 mm³’e kadar AlTiN kaplamalı takımın aşınmasının daha az olduğu görülmektedir. Ancak Bu noktadan sonra kaplamasız takımın aşınmasının durağanlaştığı ve en düşük aşınmanın meydana geldiği tespit edilmiştir. TiN kaplamalı takım ise en kötü performansı sergileyen takım olarak karşımıza çıkmaktadır. Ancak literatürde yapılan araştırmalarda esas aşınma kriterinin kesici kenar üzerinden değerlendirilmesi gerektiği üzerinde durulmuştur.



Şekil 4.11 Takım bazında kesici ağız aşınması sonuçları.

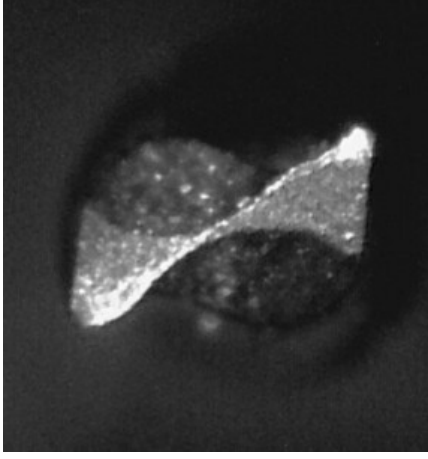
Şekil 4.12’de takımların kesici kenar aşınması performansları verilmiştir. Kenar aşınmasında yine AlTiN kaplamalı ikinci freze ucu en iyi gibi görünmektedir. Ancak kesici kenarın kırılmasından sonra (Resim 4.1) en fazla aşınma onda gerçekleşmiştir. Diğer freze uçları arasında takım ömrü en uzun olan beklendiği gibi AlTiN kaplamalı

takım olmuştur. Ancak TiN kaplamalı takımın aşınma performansı düşük şekilde ortaya çıkmıştır.

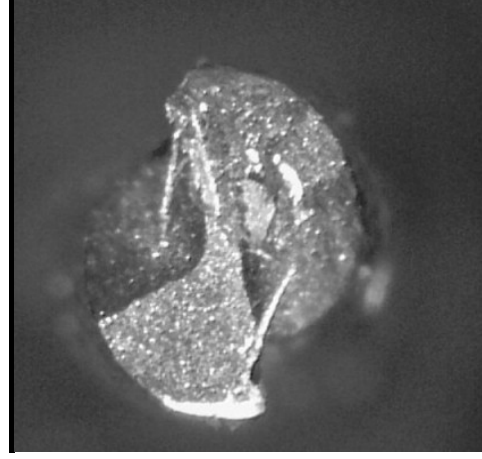


Şekil 4.12 Takım bazında kesici kenar aşınması sonuçları.

Ayrıca kesici takım aşınma profilinin kesici takım geometrisine bağlı olarak farklılık gösterdiği tespit edilmiştir. Resim 4.2-a'da bulunan birinci tip AlTiN freze ucunun kesici ağız arkasının et kalınlığını helis derinliğinden dolayı azaltmıştır. Ayrıca arka boşluk açısından dolayı kama yani kesme açısı azaltmıştır. Tam tersine Resim 4.2-b'de bulunan kesici takımda ise helis derinliği az ve arka boşluk açısı, kesme açısını zayıflatmamıştır. Bu nedenle a'daki takım kaplamaya rağmen takımda oluşan ısıyı dışarı atamamaktadır. Oluşan ısı takım üzerinde kalarak aşınmayı hızlandırmıştır. Resim 4.2-b'de bulunan takımda ise kesme açısının büyük olmasından dolayı daha fazla kesme kuvveti oluşmaktadır. Buda takım kesici ağzında küçük kırıklara ve arkasından aşınmaya sebep olmaktadır.



(a)



(b)

Resim 4.2 Kesici geometrisine bağılı aşınma, a) AlTiN kaplamalı birinci tip mikro freze, b) AlTiN kaplamalı ikinci tip mikro freze, (60x büyütme).

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Yapılan çalışmada AISI 1045 karbonlu çelik malzeme, kaplamasız Tungsten Karbür, AlTiN, TiN kaplamalı ve çapı 0,8 mm olan mikro kesici takımlar kullanılarak frezeleme işlemi yapılmıştır. Kullanılan kesici takımlar, çapı itibari ile endüstrideki etkin ve yaygın bir şekilde kullanıldığı için tercih edilmiştir. Uygulanan parametreler de sektöre uygun olacak şekilde seçilmiştir. Yapılan çalışmada öncelikli olarak takımların belirli parametreler altında çıkartmış oldukları ortalama yüzey pürüzlülükleri ölçülmüş ve tespit edilmiştir. İkinci aşamada aynı tip freze uçları ve farklı olarak ikinci tip AlTiN kaplamalı freze ucu kullanılarak aşınma deneyleri gerçekleştirilmiştir.

Kaplamasız 800 µm çaplı freze ucu kullanarak dakikada 18000 devirle yapılan deneyde en iyi ortalama yüzey pürüzlülük değeri (Ra) 221 µm olarak, 15 µm talaş derinliğinde ve 75 mm/dak ilerleme hızında elde edilmiştir. En yüksek pürüzlülük değeri 573 µm olarak 10 µm talaş derinliğinde, 300 mm/dak ilerleme hızında elde edilmiştir.

TiN kaplamalı 800 µm çaplı mikro freze ucu kullanarak dakikada 18000 devirle yapılan deneyde en iyi ortalama yüzey pürüzlülüğü değeri (Ra) 161 µm olarak, 20 µm talaş derinliğinde ve 75 mm/dak ilerleme hızında elde edilmiştir. En yüksek pürüzlülük değeri 663 µm olarak 10 µm talaş derinliğinde, 300 mm/dak ilerleme hızında elde edilmiştir.

AlTiN kaplamalı 800 µm çaplı freze ucu kullanarak dakikada 18000 devirle yapılan deneyde en iyi yüzey pürüzlülüğü değeri (Ra) 129 µm olarak, 15 µm talaş derinliğinde ve 250 mm/dak ilerleme hızında elde edilmiştir. En yüksek pürüzlülük değeri 423 µm olarak 10 µm talaş derinliğinde, 300 mm/dak ilerleme hızında elde edilmiştir.

İkinci aşama deneylerinde bütün parametreler sabit tutularak takımların aşınma performansları tespit edilmeye çalışılmıştır. Mikro frezelerin imalatı esnasında helislerinin oluşturulması ve uç açılarının verilmesi taşlama usulü ile yapılmaktadır. Bu sebepten dolayı üretim sırasında, takım geometrilerinin oluşturulması en önemli detayı oluşturmaktadır. Türkiye şartlarında bunlara dikkat edilmediği görülmektedir. Bu

sebeple aşınma çalışmasında diğer deneylerde kullanılan takımlara ek olarak geometrisi farklı, fakat aynı çapta AlTiN kaplamalı bir kesici daha kullanılmıştır.

800 µm çaplı mikro frezelerle 18000 dev/dak'da yapılan aşınma deneyinde talaş derinliği 17,5 µm, ilerleme 75 mm/dak alınarak 160 mm boyda 5 adet kanal açılmıştır. Sonuçta en iyi aşınma performansını AlTiN kaplamalı 1. tip takım göstermiştir. Ancak kesme şartlarının uygun olmamasından dolayı zaman zaman takımlar deneyi bitiremeden kırılmıştır. Bunun nedeni olarak tezgâhın yüksek devir ve hareket kabiliyetinden kaynaklanan titreşimleri absorbe edememesi olarak gösterebiliriz. Bu sebeple 2. tip takımın kesici ağzındaki meydana gelen kırılmalar önlenabilirse daha farklı aşınma sonuçları elde edilebilirdi.

5.1 Öneriler

Bu çalışmada yapılan deneylerde elde edilen sonuçlar sabit parametreler altında tasarlanarak elde edilmiştir. Yüzey pürüzlülüğünde en önemli parametrelerden ikisi olan kesme hızı sabit tutulmuş, uç yarıçapı ise göz ardı edilmiştir. Ancak yapılan literatür araştırmasında kesme hızı ve kesici uç yarıçapının pürüzlülüğü etkileyen diğer iki faktör olduğu anlaşılabilmektedir.

Ancak kalıp sektöründe parçaların imalatında yüzey pürüzlülüğü esas alınmaktadır. Plastik ürünün kalıp boşluğundan kayarak çıkması tamamen yüzey kalitesi ile doğru orantılıdır. Bu nedenle son finiş pasosu yerine kesme parametreleri sağlandığı takdirde, AlTiN kaplamalı takım 18000 dev/dak hızda, 15 µm talaş derinliğinde ve 250 mm/dak ilerleme hızında kullanılabilir.

Mikro frezeleme, geleneksel frezelemeden çok farklı olarak karmaşık parametrelere sahiptir. Bu nedenle bu alanda yapılacak olan çalışmalarda, parametreler bütünü ile dikkate alınarak deneyler gerçekleştirilmelidir. Bunları kullandığımız parametreler haricinde, kesici uç yarıçapı, tezgâh titreşim rijitliği, kesme kuvvetleri, takım kaplaması kalınlığı-türü, helis geometrisi, kesme hızı ve çalışma ortamı sıcaklığı olarak sıralayabiliriz.

6. KAYNAKLAR

Akın, T., Najafı, K., Smoke, R. and Bradley, R. M., 1994, "A Micromachined Silicon Sieve Electrode for Nerve Regeneration Applications", IEEE Trans. On Biomedical Engineering, Vol. BME-41, No. 4, 305- 313.

Bissacco, G., Hansen, H.N., Chiffre, L. De, 2006, "Size Effects on Surface Generation in Micro Milling of Hardened Tool Steel", CIRP Annals, Manufacturing Technolog, Volume 55, pp. 593–596.

Bloomstein, T. M. and Ehrlich, D. J., 1991, "Laser Deposition and Etching of Three-dimensional Microstructures", IEEE Press, 507–511.

Budak, E., 2000, "Improving productivity and part quality in milling of titanium based impellers by chatter suppression and force control", Annals of CIRP 49 31–36.

Chae, J., Park, S. and Freiheit, T., 2006, "Investigation of micro-cutting operations", International Journal of Machine Tools & Manufacture 46, 313–332.

Cox, D., Newby, G., Park, H. and Liang, S., 2004, "Performance evaluation of a miniaturized machining center for precision manufacturing". Paper presented at the Proceedings ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition., Anaheim California.

Dhanorker A. and Özel T., 2006, "An Experimental and Modeling Study on Meso/Micro End Milling Process".

Ducobu, F., Filippi, E. and Lorphèvre, E. R., 2009, " Investigations on Chip Formation in Micromilling", <http://www.geniemeca.fpms.ac.be/Recherche/Articles/ducob2009c.pdf>.

Fang, N., 2005, " Tool-chip friction in machining with a large negative rake angle tool", Wear, 258, 890–897.

Guckel, H., 1997, “Micromechanics for Microactuators and Precision Engineering”, Precision Engineering (Seminer Notları).

Gwo, L. C. , Ying, J. E. Wu, Jyun C. C., Jian C. Y., 2007, ”Study on Burr Formation in Micro Machining Using Micro Tools Fabricated By Micro EDM”, Precision Engineering(Seminer Notları), 31, 122–129.

Heaney, P. J. , Sumant, A. V. , Torres, C.D. , Carpick, R. W. , Pfeifferkorn, F. E., 2008, ‘Diamond Coatings for Micro End Mills: Enabling the Dry Machining of Aluminum at the Micro Scale’, Diamond & Related Materials 17, 223 – 233.

Kalpajian, S. and Schmid, S. R., 2002, "Manufacturing Processes for Engineering Materials", Paper presented at the Prentice-Hall.

Kaplan, H., Dölen, M., 2003, “Mikro-Elektro-Mekanik-Sistemler(Mems): Üretim Teknikleri”, 11. Ulusal Makina Teorisi Sempozyumu.

Kinoshita, H., Veda, K. Murai, S., and Hayashi, K., 1993, “Micro-wire Electrical Discharge Machining”, Proc. of the 1st IIFTOMM International Micro mechanism Symposium, 114-119.

Kim, J. D. and Kim, D. S., 1995, "Theoretical analysis of micro-cutting characteristics in ultra-precision machining", Journal of materials Processing Technology, 49, 387–398.

Kutlu, M., 2006, “Üç Eksenli Masa Tipi Cnc Freze Tezgâhı Tasarım ve İmalatı”, Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Afyon.

Kovacs, G. T. A., Maluf, N. I., and Petersen, K. E., 1998, "Bulk Machining of Silicon", Proc. of the IEEE, Vol. 86:8, 1536-1551.

Lacalle, L. N. L. d. and Lamikiz, A., 2009, "Machine Tools for High Performance Machining".

Lee K., Dornfeld D. A., 2004, "A Study of Surface Roughness in the Micro-End-Milling Process", <http://www.escholarship.org/uc/item/51r6b592>.

Lee K., Essel I., Dornfeld D. A., 2001, "Burr Formation in Micro Milling", http://www.aspe.net/publications/Annual_2001/Pdf/Posters/Process/Machine/1254.Pdf.

Liu X., DeVor, R. E., Kapoor, S. G. and Ehmann K. F., 2004, "The Mechanics of Machining at the Microscale: Assessment of the Current State of the Science On", Asme, J. Manuf. Sci. Eng., 126(11), pp. 666–678.

Newby, G., 2005, "Empirical Analysis of Cutting Force Constants in Micro End Milling Operations", Master of Science in Mechanical Engineering, Georgia Institute of Technology, USA.

Okazaki, Y., Mishima, N. and Ashida, K., 2004, "Microfactory-concept, history, and developments", Journal of Manufacturing Science and Engineering, 126, 837–844.

Onikura, H., Ohnishi, O. and Take, Y., 2000, "Fabrication of Micro Carbide Tools by Ultrasonic Vibration Grinding", Annals of the CIRP, 491, 257-260.

Ozdoğanlar, O. B., Filiz, S., 2006, "Characteristics of Mechanical Micromilling Using Tungsten Carbide Tools", http://www.aspe.net/publications/Annual_2006/posters/5process/2mach/2050.pdf.

Özel, T., Liu, X. and Dhanorker, A., 2007, "Modelling and Simulation of Micro-Milling Process", http://ie.rutgers.edu/research/working_paper/paper_07-018.pdf.

Pham D.T., Elkaseer A.M., Popov K.P., Dimov S.S., Olejnik L. and Rosochowski A., 2008, “An Experimental and Statistical Study of the Factors Affecting Surface Roughness in the Micromilling Process”, *International Journal of Materials and Product Technology*-Volume 32, Number 2-3, pp. 264 – 275.

Rodriguez, P., Perez, H., Labarga, J.E. and Vizan, A., 2008, “Research On Tool Life in Micro End Milling as Related to Workpiece Quality Criteria”, *Proceedings of ECTC Asme*.

Rooks, B., 2004, "The shrinking sizes in micro manufacturing", *Assembly Automation*, 244, 352–356.

SAMANCIOĞLU, A., 2010, “Mikro Frezelenme İşleminde Kesme Parametrelerinin Takım Deformasyonu Üzerindeki Etkisinin Araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Afyon.

Schaller, T., Bohn, L., Mayer, J. and Schubert, K., 1999, "Microstructure grooves with a width of less than 50µm cut with ground hard metal micro end mills", *Precision Engineering*, 23, 229-235.

Schmidt, J., Tritschler, H., 2004, "Micro Cutting of Steel", Springer pp. 167–174.

Shimbo, I. M., Furukawa, K., Fukuda, K., and Tanzawa, K., 1986, “Silicon-to-Silicon Direct Bonding Method”, *J. Applied Physics*, Vol. 60, 2987-2989.

Son, S. M., Lim H. S., Ahn J. H., 2005, “Effects of the Friction Coefficient on the Minimum Cutting Thickness in Micro Cutting”, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 45, 529–535.

Takács, M., Verő, B. and Mészáros, I., 2003, "Micromilling of Metallic Materials", *Journal of Materials Processing Technology* 138, 152–155.

Uhlmann, E., Piltz, S., Schauer, K., “Micro Milling of Sintered Tungsten–Copper Composite Materials”, *Journal of Materials Processing Technology* 167, 402–407.

Vogler, M. P., DeVor, R. E., and Kapoor, S. G., 2004, “On the Modeling and Analysis of Machining Performance in Micro-endmilling, Part I: Surface Generation”, *Asme, J. Manuf. Sci. Eng.*, 126-4, pp. 684–693.

Wang, J., Gong, Y., Abba, G., Chen, K., Shi, J., Cai, G., 2007, “Surface Generation Analysis in Micro End-Milling Considering the Influences of Grain”, *Publishing/DTIP*, 25-27.

Wang, J., Gong, Y., Shi, J. and Abba, G., 2009, “Surface Roughness Prediction in Micromilling using Neural Networks and Taguchi’s Design of Experiments”, *Proceedings of the IEEE International Conference on Industrial Technology*.

Zhu K., Wong Y. S., Hong G. S., 2009, “Multi-Category Micro-Milling Tool Wear Monitoring With Continuous Hidden Markov Models”, *Mechanical Systems and Signal Processing* 23, 547– 560.

6.1 İnternet Kaynakları

	Erişim Tarihi
1- http://mems.sandia.gov/ ,	13.03.2010.
2- http://www.ptonline.com/articles/200212fa1.html .	15.03.2010
3- http://www.cadcamsektoru.com/talasli-imalatta-kullanilankesici-takimlar-949.htm	18.03.2010
4- www.titanit.com.tr/ .	15.03.2010
5- http://www.mmsonline.com/articles/understanding-micro-milling-machine-technology .	20.11.2009
6- http://www.micromanufacturing.com	25.04.2010
7- http://high-speed-machining.blogspot.com/2009/01/high-speed-machining-with-micro-tooling.html	12.02.2010
8- http://www.gimbal.com.au-resimler	15.02.2010
9- http://www.micro-lution-inc.com/products/prototyping.php	15.04.2010

7. ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı :Erçin TÜTÜNSATAR
Doğum Yeri :Turgutlu/Manisa
Doğum Tarihi :04.07.1977
Medeni Hali :Evli
Yabancı Dili :İngilizce

Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise :Turgutlu Teknik Lise ve Endüstri Meslek Lisesi, 1994
Lisans :Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi, 1999
Yüksek Lisans :Afyon Kocatepe Üniversitesi, 2010

Çalıştığı Kurum/Yıl aralığı

Salihli Teknik Lise ve Endüstri Meslek Lisesi 1999 / 2009
Turgutlu Teknik Lise ve Endüstri Meslek Lisesi 2009 /.....