



An experimental study on relationship between tool wear - slot geometry in micromachining

Kubilay Aslantaş¹, Adem Çiçek², Safiye Gülbin Çelik¹

¹Afyon Kocatepe University, Faculty of Technology, Department of Mechanical Engineering, 03200, Afyonkarahisar, Turkey

²Yıldırım Beyazıt University, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Department of Mechanical Engineering, 06010, Ankara, Turkey

Highlights:

- Peripheral wear causes the slot width to decrease and the slot edge radius to increase
- The increased cutting length causes the burr width to increase
- The maximum burr width was obtained in the down milling direction

Keywords:

- Micro-milling
- Tool wear
- Burr formation
- Slot geometry
- Inconel 718

Article Info:

Received: 26.02.2017

Accepted: 27.04.2017

DOI:

10.17341/gazimmfd.416425

Acknowledgement:

This work was supported by grants from the TUBITAK, Project No: 213M572

Correspondence:

Author:K. Aslantaş
e-mail: aslantas@aku.edu.tr
phone: +90 272 228 14 46

Graphical/Tabular Abstract

In this study, the effect of tool wear on slot geometry was experimentally investigated in a micro-milling process. In the tests, Inconel 718 super alloy was selected as workpiece material and constant cutting parameters were considered. The tests were conducted under dry conditions and dimensional changes in micro-slots, burr formation and variations in cutting forces during/after consecutive cutting processes were investigated.

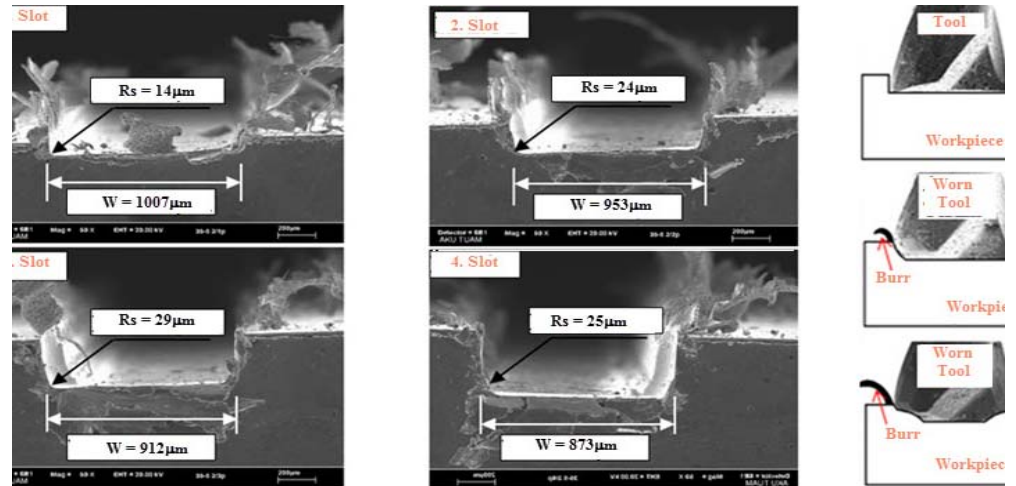


Figure A. SEM images of slot exit point. Schematic presentation of the effect of tool wear on slot geometry and burr size Rs:Slot edge radius, W:Slot width

Purpose: In this study, as a result of the abrasive wear in micro-cutting tool, the dimensional change in the geometry of the machine slot was investigated experimentally. The relationship between the deterioration of tool geometry and change in slot geometry was tried to be defined.

Theory and Methods: The study was carried out experimentally. The forces during cutting are measured by Kistler dynamometer. Caliper software was used to measure the wear in the cutting tool. SEM analysis was performed on both the machined slots and the worn tools. Surface roughness measurements were performed by optical profilometer.

Results:

According to the obtained results, abrasive wear mechanism, the cutting tool is worn both peripheral and axially. While peripheral wear causes the tool diameter to decrease, axial wear causes the slot depth to change. Since the abrasion in the tool causes deterioration of the tool geometry (especially the edge radius), the cutting forces increase due to the increased cutting length. As the peripheral wear is more dominant, along with the increased cutting length, the reduction in the slot width is greater than the change in the slot depth. It was observed that the Ra values were higher in the up-milling side

Conclusion:

In micro milling of the Inconel 718 alloy, abrasive wear causes the tool diameter and edge radius to change. Both the peripheral and the axial wear occur in the micro tool. Since the peripheral wear is greater in the tool, the change in the slot width is greater than the depth of the slot. The tool edge radius increases with abrasive wear. As a result, burr formation increases.



Mikro işlemede takım aşınması - kanal geometrisi ilişkisi üzerine deneysel bir çalışma

Kubilay Aslantaş^{1*}, Adem Çiçek², Safiye Gülbin Çelik¹

¹Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Makine Mühendisliği, 03200, Afyonkarahisar, Türkiye

²Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Makine Mühendisliği, 06010, Ankara, Türkiye

Ö N E Ç İ K A N L A R

- Çevresel aşınma, kanal genişliğinin azalmasına ve kanal kenar radyüsünün artmasına neden olmaktadır
- Artan kesme uzunluğu çapak genişliğinin artmasına neden olmaktadır
- Maksimum çapak genişliği zıt yönlü frezeleme yönünde elde edilmiştir

Makale Bilgileri

Geliş: 26.02.2017

Kabul: 27.04.2017

DOI:

10.17341/gazimmfd.416425

Anahtar Kelimeler:

Mikro frezeleme,
takım aşınması,
çapak oluşumu,
kanal geometrisi

ÖZET

Bu çalışmada, mikro frezeleme işleminde takımda meydana gelen aşınmanın kanal geometrisi üzerinde etkisi deneysel olarak araştırılmıştır. Deneylerde, iş parçası olarak Inconel 718 alaşımı tercih edilmiş olup, sabit kesme parametreleri dikkate alınmıştır. Deneyler kuru kesme şartlarında yapılmış olup, ardışık kesme işlemleriyle mikro kanallardaki boyutsal değişim, çapak oluşumu ve kesme kuvvetlerindeki değişim araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre takım çapında meydana gelen çevresel aşınma artan kesme mesafesi ile artmaktadır. Takımda çevresel aşınmanın yanı sıra ekstenel bir aşınma da meydana gelmektedir. Ekstenel aşınma, takım köşe radyüsünün zamanla değişmesine neden olmaktadır. Köşe radyüsünün artması kanal geometrisinin bozulmasına ve çapak oluşumunun artmasına neden olmaktadır. Ayrıca kesici takıma yapışan talaş ta köşe radyüsünün büyümesine neden olmaktadır. Bunun sonucunda kesme işlemi, kazanma ağırlık bir kesmeye dönüşmekte ve kesme kuvvetleri de artmaktadır.

An experimental study on relationship between tool wear - slot geometry in micromachining

H I G H L I G H T S

- Peripheral wear causes the slot width to decrease and the slot edge radius to increase
- The increased cutting length causes the burr width to increase
- The maximum burr width was obtained in the up milling direction

Article Info

Received: 26.02.2017

Accepted: 27.04.2017

DOI:

10.17341/gazimmfd.416425

Keywords:

Micro - milling,
tool wear,
burr formation,
slot geometry

ABSTRACT

In this study, the effect of tool wear on slot geometry was experimentally investigated in a micro-milling process. In the tests, Inconel 718 superalloy was selected as workpiece material and constant cutting parameters were considered. The tests were conducted under dry conditions and dimensional changes in micro-slots, burr formation and variations in cutting forces during/after consecutive cutting processes were investigated. According to the obtained results, peripheral wear formed on tool diameter increases with increasing cutting distance. An axial wear as well as the peripheral wear also forms on the cutting tool. Axial wear leads to variation of tool corner radius with the time. An increase in tool corner radius causes to deterioration of slot geometry and additional burr formation. In addition, the chips adhered to cutting tool also leads to an increase in tool corner radius. So, the cutting process turns into a ploughing dominant cutting process and the cutting forces increase.

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: aslantas@aku.edu.tr/ Tel: +90 272 228 14 46

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Mikro işleme, genel olarak 1-1000 µm ölçü aralığındaki kesici takımların kullanıldığı bir imalat yöntemidir [1-3]. Bu ölçü aralığına sahip ekipmanların üretiminde bugün pek çok yöntemin kullanıldığı görülmektedir. Bu yöntemler arasındaki temel fark ise, parça üzerinden malzeme uzaklaştırmada kullandıkları yöntemdir. Bu yöntemleri, kimyasal, elektriksel ve mekanik olmak üzere üç farklı gruba ayırmak mümkündür [4]. Mikro ölçekte ürün imalatında, çok daha az bir zamanda ve hassas bir üretim gerçekleştirilmesi önemli bir olgudur. Çünkü geliştirilen mikro ürünlerin ticarileşmesi onların seri olarak imal edilebilmelerine bağlıdır [5]. Mikro mekanik işleme, bu ihtiyaç doğrultusunda oluşturulan bir imalat yöntemi olarak ortaya çıkmıştır. Günümüzde mikro ekipman üretiminde yaygın olarak tercih edilen mikro mekanik işleme, temel olarak geleneksel tornalama, frezeleme ve delik delme işlemlerinin mikro ölçekte yapılmasına imkan sağlayan bir talaşlı imalat sürecidir. Fakat bu imalat yöntemlerinde mikro - boyutta takımların kullanılması nedeniyle, kesme esnasında maruz kaldıkları kuvvetler bu takımların kolaylıkla kırılmalarına neden olmaktadır. Ayrıca, takımların işleme sırasında elastik olarak şekil değiştirmesi (eğilme), işleme hassasiyetinin azalmasına sebebiyet vermektedir.

Mikro frezeleme işlemi, temel olarak geleneksel frezeleme işlemine oldukça benzemektedir. Bir anlamda geleneksel frezelemenin boyutunun küçültülmüş hali de denilebilir [6-8]. Mikro ve geleneksel frezeleme arasındaki farkta, buradan kaynaklanmaktadır. Mikro frezeleme, geleneksel frezeleme olarak da bilinen makro frezelemeden, talaş kaldırma teorisi açısından ayrılmaktadır. Yapılan çalışmalarda imalat sürecinin çok küçük boyutlarda gerçekleştirilmesinden dolayı meydana gelen bir takım olumsuzluklara çözüm aranmıştır. Özellikle geleneksel frezelemede ihmal edilen küçük titreşimler ve kesme kuvvetleri gibi imalatı olumsuz etkileyen bazı koşullar, frezeleme işleminin verimliliğini etkilediği ileri sürülmektedir. Mikro frezeleme işleminde, talaş kaldırma sürecinde tercih edilen kesme parametreleri, düzgün bir talaş akışının gerçekleşmesi açısından önemlidir. Bu parametrelerde, gerekli optimizasyonun sağlanmaması, kesme işlemi sırasında uniform bir talaş oluşumunun gerçekleşmemesine neden olmaktadır. Bunun yerine kesici takım, iş parçası yüzeyinde adeta bir ovalama/kazıma işlemi yaparak, iş parçasının elasto-plastik olarak şekil değiştirmesini sağlamaktadır.

Mikro frezelemeyi geleneksel frezelemeden ayıran en temel unsur hiç şüphesiz, her iki işlem arasındaki boyut farklılığıdır. Bu durum, mikro frezelemeyi daha karmaşık hale getirmektedir. Mikro frezelemede, kesici takım kenar radyüsü, düzgün bir talaş oluşumunun meydana gelmesi açısından önemli bir rol oynamaktadır [5]. Geleneksel frezeleme işleminde, kesme derinliği genellikle kesici takımın kenar radyüsünden çok büyük olduğu için kesme sırasında düzgün bir talaş oluşumu sağlanabilmektedir [5, 9]. Bu durum, mikro frezeleme için her zaman mümkün

değildir. Çünkü mikro frezelemede, kesme derinliği veya dış başına düşen ilerleme miktarının kesici takım kenar radyüsüne oranı genellikle büyüktür [10, 11]. Böyle bir durumda kesici takım kenar radyüsünün de etkisiyle kesici takım kenarı, negatif bir talaş açısı karakteri sergilemekte, hatta talaş kaldırmak için yeterli derinliğe ulaşamamaktadır. Bu durum, kesme işleminde kararsızlıklara sebep olmaktadır [12, 13]. Bu yüzden, mikro frezeleme işleminde düzgün bir talaş oluşumunun meydana gelmesi için kesme derinliği ve ağız başına düşen ilerleme miktarının takım kenar radyüsü ile arasında optimum bir oranın sağlanması gerekmektedir. Bu oran, minimum talaş kalınlığı ya da kritik talaş kalınlığı olarak tanımlanmaktadır [14]. Şekil 1'de görüldüğü üzere küçük kesme derinliklerinde malzeme, daha çok elastik olarak deforme olmaktadır.

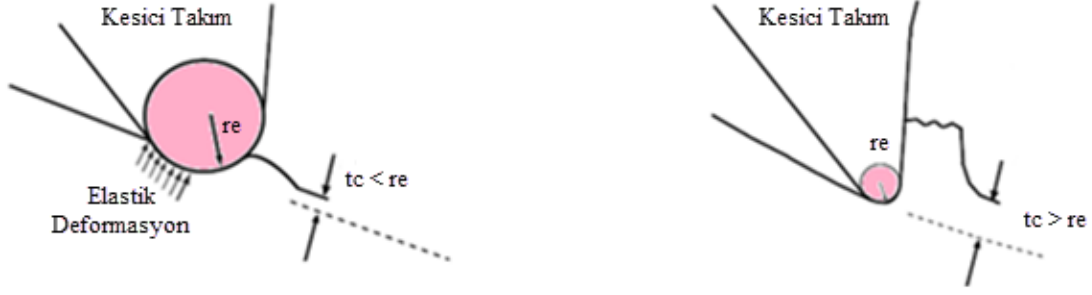
Mikro frezeleme işleminde meydana gelen aşınmanın en önemli etkisi, kesici takım çapı ve kenar radyüsündeki değişimdir. Aşınma sonucu kenar radyüsünde bir artış ve takım çapında ise azalma meydana gelmektedir [15]. Bu durum, imalatı gerçekleştirilen ürünün gerek boyutsal gerekse geometrik olarak hassasiyetini kaybetmesine neden olmaktadır [16]. Aşınma ile görülen kenar radyüsündeki artış talaş oluşum mekanizmasını etkileyen minimum talaş kalınlığı değerinin de değişmesine neden olacaktır. Özellikle kesme işleminin başlangıcında pozitif olan talaş açısı, kenar radyüsündeki büyümeyle birlikte negatif bir görünüm kazanmaktadır. Bunun sonucu olarak da kesme işlemi sırasında çapak oluşumu gibi istenmeyen durumlarla karşılaşabilmektedir [17].

Bu çalışmada, kesici takımda meydana gelen hem çevresel hem de eksenel aşınma sonucu, işlenen kanal geometrisindeki boyutsal değişim deneysel olarak araştırılmıştır (Şekil 2). Takım geometrisindeki bozulma ile kanal geometrisindeki değişim arasında ilişki tanımlanmaya çalışılmıştır. Ayrıca kesme mesafesinin artmasıyla birlikte kesme kuvvetlerinin, çapak oluşumunun ve yüzey kalitesinin değişimi de bu çalışmada elde edilen diğer sonuçlardır. Aşınan takım üzerinde yapılan Taramalı Elektron Mikroskop (SEM) ve Enerji Dağılımlı X-Işımları (EDX) analizleri ile aşınma mekanizması tanımlanmaya çalışılmıştır.

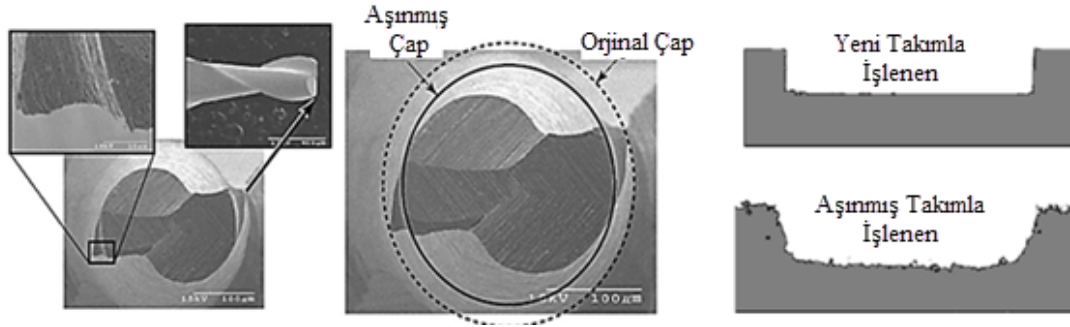
2. MATERYAL VE METOD (MATERIAL AND METHOD)

2.1. Deneysel Düzenek (Experimental Setup)

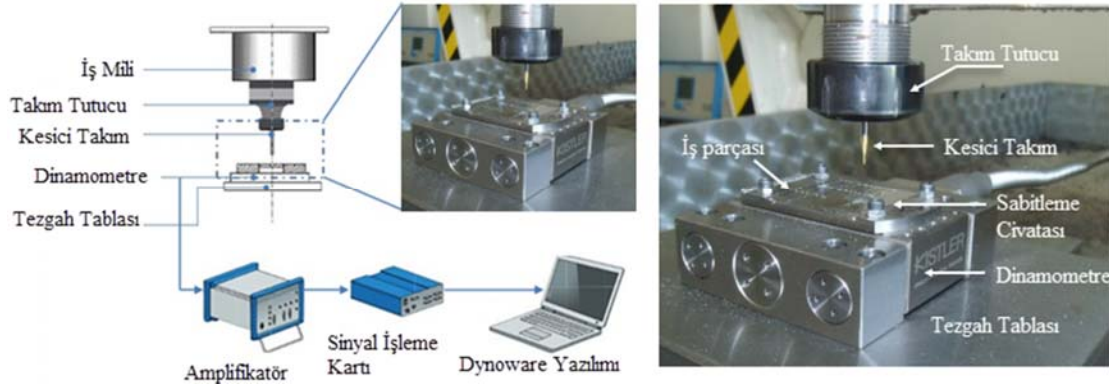
Bu çalışmada, işlenmesi zor olarak bilinen ve havacılık sanayinde sıklıkla kullanılan Inconel 718 süper alaşımı iş parçası malzemesi olarak kullanılmıştır. Deneyler, Afyon Kocatepe Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı bünyesindeki CNC dik işleme merkezi ile gerçekleştirilmiştir. CNC tezgâh, 3 eksenli olup, 2,2 kW motor gücüne 24000 dev/dk. iş mili hızına sahiptir. Şekil 3'te deney düzenekleri ayrıntılı olarak verilmiştir. Kesme deneylerinde, talaş derinliği, kesme hızı ve ilerleme değerleri sabit alınmış olup, takımda meydana gelen aşınmanın kanal geometrisine etkisi tespit edilmeye çalışılmıştır (Tablo 1).



Şekil 1. Kesici uç yarıçapının minimum talaş kalınlığına etkisi [3] (Effect of cutting edge radius on minimum chip thickness)



Şekil 2. Kesici takımında meydana gelen aşınma sonucu kanal geometrisindeki değişim [17]
(Variation in slot geometry as a result of wear on the cutting tool)



Şekil 3. Mikro frezeleme işleminde kullanılan deney düzeneği (Experimental setup used in the micro - milling process.)

Tablo 1. Tek bir kesici takım için yapılan kesme deneyi sistematığı ve kesme parametreleri
(Cutting test system and cutting parameters for a single cutting tool.)

Devir N (dev/dk)	Kesici Ağıza düşen İlerleme f_z ($\mu\text{m}/\text{diş}$)	Talaş Derinliği, a_p (μm)	Toplam Kesme Mesafesi L_c (mm)
10000	3	100	1.Kanal $L_c = 43\text{mm}$ 2.Kanal $L_c = 129\text{mm}$ 3.Kanal $L_c = 258\text{mm}$ 4.Kanal $L_c = 430\text{mm}$

Her bir kesme deneyinde toplam 4 adet kanal işlenmiş olup, 2. kanaldan 2 paso, 3. kanaldan 3 ve 4. kanaldan da 4 paso talaş kaldırma işlemi yapılmıştır. Böylece her bir kesici takım için toplam kesme uzunluğu 430mm olmuştur. Bu tür bir kesme işleminin tercih edilmesindeki amaç; ardışık kesme işlemlerinde hem çapak oluşumunun hem de kesme

kuvvetlerinin değişiminin elde edilmek istenmesidir. Kesme deneyleri öncesinde takımında meydana gelen radyal sapma komparatör yardımıyla tespit edilmiş olup bu değer yaklaşık $2\mu\text{m}$ olduğu tespit edilmiştir. Kesme parametreleri kesici takım katalog değerlerine uygun seçilmiştir. Deneylerde herhangi bir soğutma yağlama sistemi

kullanılmamış tüm deneyler kuru kesme koşullarında yapılmıştır. Tüm kesme şartlarının kombinasyonu için kuvvet ölçümü yapılmıştır. Kesme kuvveti ölçümleri Kistler 9119AA1 tipi mini bir dinamometre ile yapılmıştır. Çapak yüksekliği ölçümleri için tarama elektron mikroskobu analizleri kullanılmıştır.

2.2. Kesici Takım ve Kesme Parametreleri (Cutting Tool and Cutting Parameters)

Inconel 718 alaşımının mikro frezelenmesinde, 1 mm çapında 2 ağızlı kesici takımlar kullanılmıştır (Şekil 4). Kesici takıma ait SEM görüntüsü ve geometrik özellikleri Şekil 4'te verilmektedir. Mikro kesme işleminde kesici takıma ait kenar radyüsü önemli bir faktördür ve kesme performansını doğrudan etkiler. Bu nedenle kesme işlemi öncesinde kesici takıma ait kenar radyüsü tespit edilmiş olup, bu değer ortalama olarak $1,75\mu\text{m}$ olarak tespit edilmiştir. Maraton Hole firmasından tedarik edilen kesici takımlar %90 WC ve %10 Co içeriğinden oluşup kaplamasızdır. Bununla birlikte kesme deneyleri boyunca $70\times 43\times 4\text{mm}$ ebatlarına sahip iş parçası kullanılmıştır. Her kanal sonunda kesici takımın meydana gelen aşınma optik mikroskop ile ölçülmüş olup, ayrıca aşınmış olan takımlar için SEM ve EDX analizleri gerçekleştirilmiştir. μm

2.3. Boyutsal Kararlılık, Çapak ve Yüzey Analizleri (Dimensional Stability, Burr, Surface Analyses)

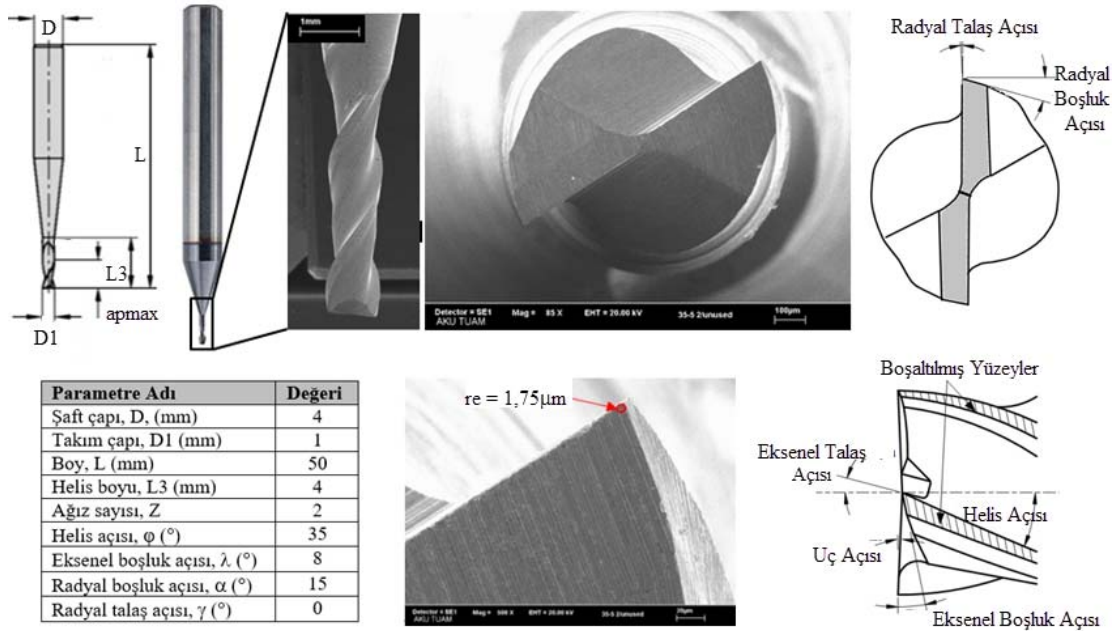
İşlenen kanallara ait yüzey pürüzlülüğü ölçümleri için Nanovea 3D optik yüzey profilometresi (Şekil 5a) kullanılmıştır. Kesme işlemi sonrasında, her bir kanalın giriş ve çıkış noktalarında kanal genişliği, kanal derinliği ve ortalama yüzey pürüzlülüğü ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca yine işlenen her bir kanalın üst yüzeyinden ve dört farklı noktadan çapak genişliği (Şekil 5b) ölçümleri

yapılmıştır. Bu ölçümler SEM fotoğrafları üzerinden gerçekleştirilmiştir ve ölçümler için Screen Caliper yazılımı kullanılmıştır. SEM görüntüsündeki ölçek baz alınarak, Screen Caliper yazılımı kalibre edilmiş ve Şekil 5b deki gibi kanal kenarlarından dışarıya sarkan çapak boyutunun genişliği mikron cinsinden ölçülmüştür. İşlenen kanalın uzunluğu 43mm dir ve yaklaşık her 10 mm de (Şekil 5c) kanalın her iki yönündeki çapak boyutları alınarak, o kanal için ortalama çapak genişliği tespit edilmiştir. Böylece takımın meydana gelen çevresel aşınma ve takım kenar radyüsündeki değişimin hem çapak boyutu hem de kanal geometrisi üzerindeki etkileri tespit edilmiştir.

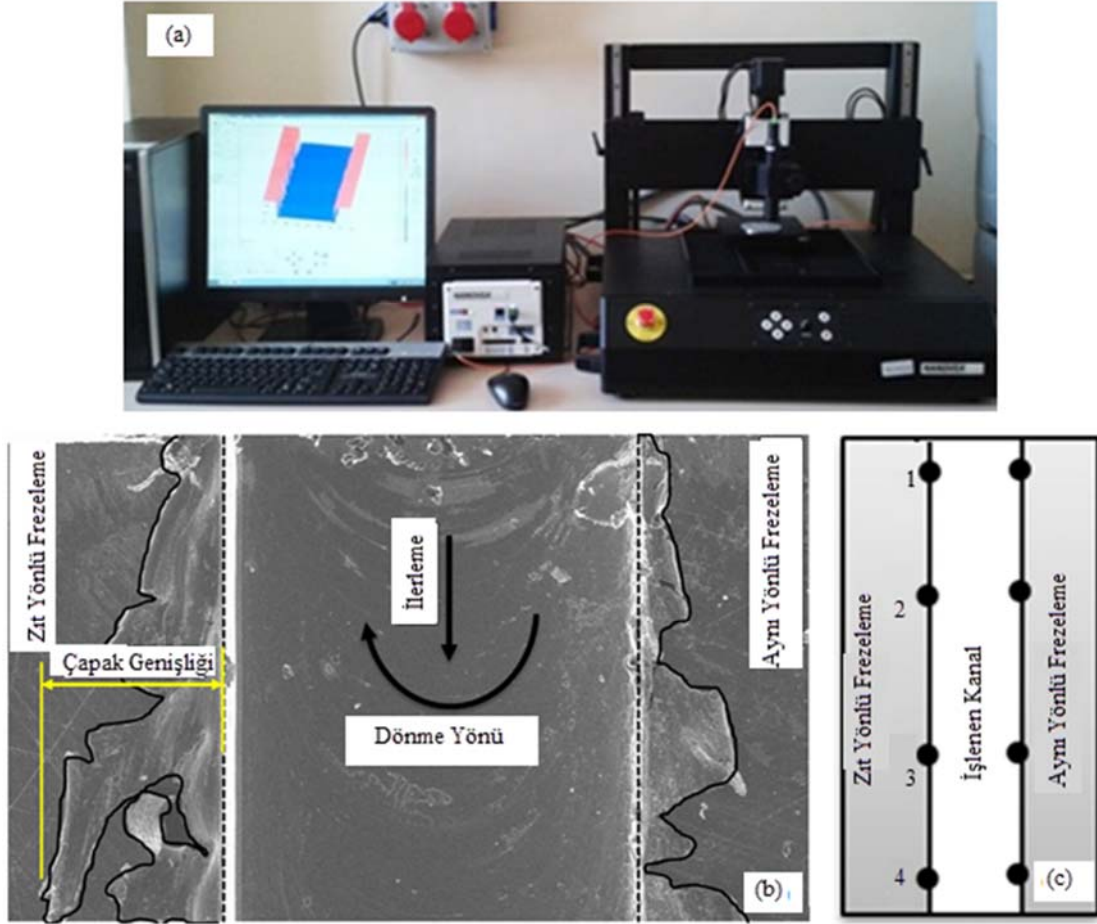
3. DENEYSEL SONUÇLAR (EXPERIMENTAL RESULTS)

3.1. Kesme Kuvvetlerinin Değişimi (Variation of Cutting Forces)

Şekil 6'da üç yöndeki kesme kuvvetinin kesme uzunluğuna bağlı olarak değişimi verilmiştir. Grafiklerde ayrıca elde edilen ortalama değerlerin yanı sıra maksimum ve minimum değerleri de verilmektedir. Şekil 7'de de her üç yönde elde edilen ortalama kesme kuvvetlerinin kesme uzunluğuna bağlı olarak değişimi verilmektedir. Şekil 6 da ilk dikkati çeken unsur; kesme kuvvetlerinin (özellikle F_x ve F_z) kesme uzunluğunun artmasına bağlı olarak artmasıdır. F_y kuvvet değerlerinde de belirli bir artış söz konusu ise de 300mm den sonra azalma gözlemlenmiştir. Kuvvet değerlerinin artmasına neden teşkil eden unsur, kesici kenardaki abrasif aşınmadır. Abrasif aşınma mekanizmasının bir sonucu olarak kenar radyüsü büyümektedir. Artan kenar radyüsü, negatif talaş açısı etkisi oluşturmakta ve böylece kesici takımın iş parçasına dalması zorlaşmaktadır. Bu durum, beraberinde kazınma etkisi oluşturmakta ve sağlıklı bir kesme işleminin oluşmasına engel teşkil etmektedir. Tüm bu unsurların bir araya gelmesiyle birlikte kesme kuvvetleri de



Şekil 4.Çalışmada kullanılan mikro takım boyutları ve SEM görüntüsü (Micro tool dimensions and its SEM image used in the study.)



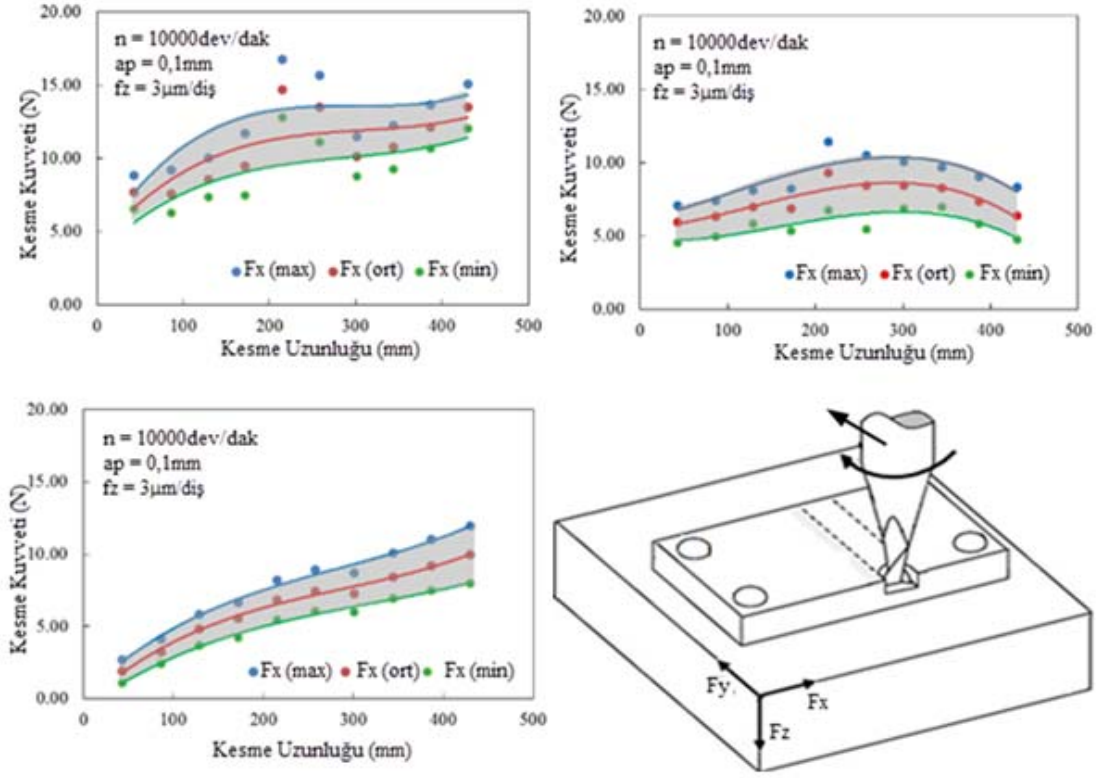
Şekil 5. a)Yüzey analizlerinde kullanılan optik profilometre b) Çapak genişliğinin ölçümü c) Kanal boyunca çapak ölçümü yapılan noktalar (a) Optical profilometer for surface analysis b)Measurement of burr width c) Points measured for burrs along the machined slot)

artmaktadır. Kesme kuvvetlerinin artmasına neden olan bir diğer unsur da talaş yapışması olabilir. Çünkü yapılan SEM ve optik mikroskop analizleri, kesici takımda önemli oranda bir talaş yapışmasının olduğunu ortaya koymuştur. Şekil 6'da özellikle Fz kuvvetinin kesme uzunluğu ile artışı dikkat çekmektedir. Çünkü ilk kanalın başında alınan Fz değeri ortalama olarak 2N civarında iken son kanal için elde edilen Fz kuvvetini ortalama değeri 10N civarındadır. Bir anlamda Fz kesme kuvveti değeri beş kat artmıştır. Takıma etkileyen Fz eksenel kuvvetinin bu denli artmasının altında yatan iki neden olabilir. Birincisi; abrasif aşınmanın etkisiyle kesici kenara verilen eksenel ve radyal boşluk açısının sıfıra yaklaşmasıdır. İkincisi ise talaşın takıma yapışması olabilir. Özellikle kesici kenara ait eksenel ve radyal boşluk açısının azalması takım - iş parçası temas uzunluğunun artmasına neden olacaktır. Bu da beraberinde sürtünme ve kazınma etkisi oluşturacaktır. Benzer bir durum, geleneksel frezeleme işlemi için Günay vd. Korkut ve Dönertaş tarafından yapılan çalışmada ele alınmıştır [18]. Şekil 7'den de görüldüğü üzere, artan kesme uzunluğuna bağlı olarak Fx ve Fz kuvvetleri artmaktadır. Çok önemli seviyede olmasa da Fy kuvveti 300mm lik kesme uzunluğu sonrasında azalma bir eğilimi göstermiştir. Fy kuvvetindeki azalmanın nedeni;

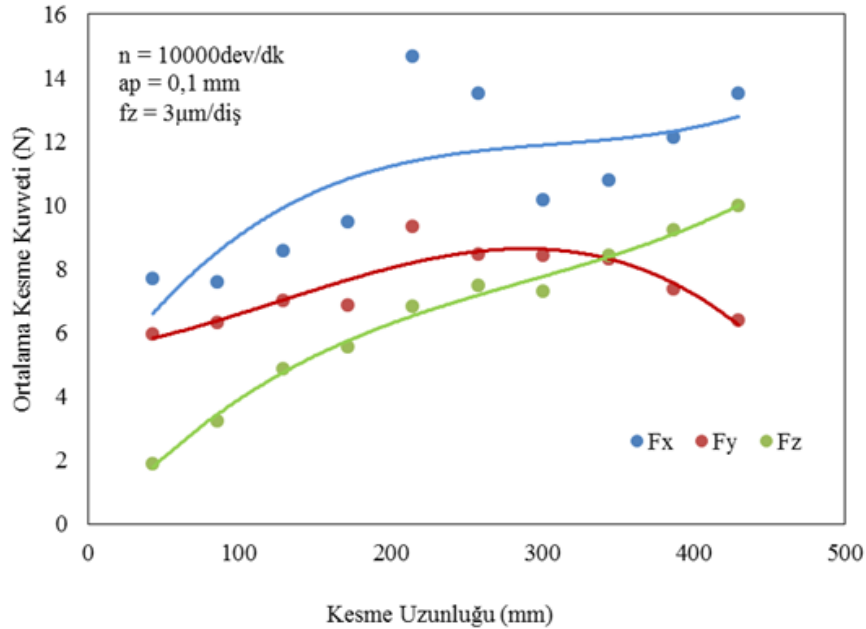
kesici takımda meydana gelen eksenel aşınma olabilir. Eksenel aşınmanın etkisiyle takım kenar radyüsü bir miktar azalır ve takımın kesme kabiliyeti artar. Bu da takımın ilerleme yönündeki Fy kuvvetinin azalmasına neden olmuş olabilir. Şekil 8'de abrasif aşınma sonucunda kesici takımda meydana gelen kenar radyüsünün büyümesi ve boşluk açısının değişimi verilmiştir. Şekil 8'de ayrıca talaşa yapışması sonucunda kenar radyüsünün değişimine ait SEM fotoğrafı da verilmektedir.

3.2. Çapak Genişliği (Burr Width)

Şekil 9'da kesme uzunluğuna bağlı olarak kanal kenarlarında meydana gelen çapak genişliğinin değişimi verilmiştir. Ayrıca grafikteki bazı noktalar için SEM görüntüleri de yine aynı şekilde verilmektedir. Dikkat edilecek olursa, 250mm lik kesme mesafesi boyunca aynı ve zıt yönlü frezelemede de çapak boyutları benzer bir seyir izlemektedir. Fakat artan kesme mesafesiyle birlikte, her iki yöndeki çapak boyutları arasındaki fark artmaktadır. Maksimum çapak genişliğinin zıt yönlü frezeleme de meydana geldiğini söylemek mümkün. Kesme işlemi öncesinde takıma ait kenar radyüsü yaklaşık 1,75µm olarak ölçülmüştür.



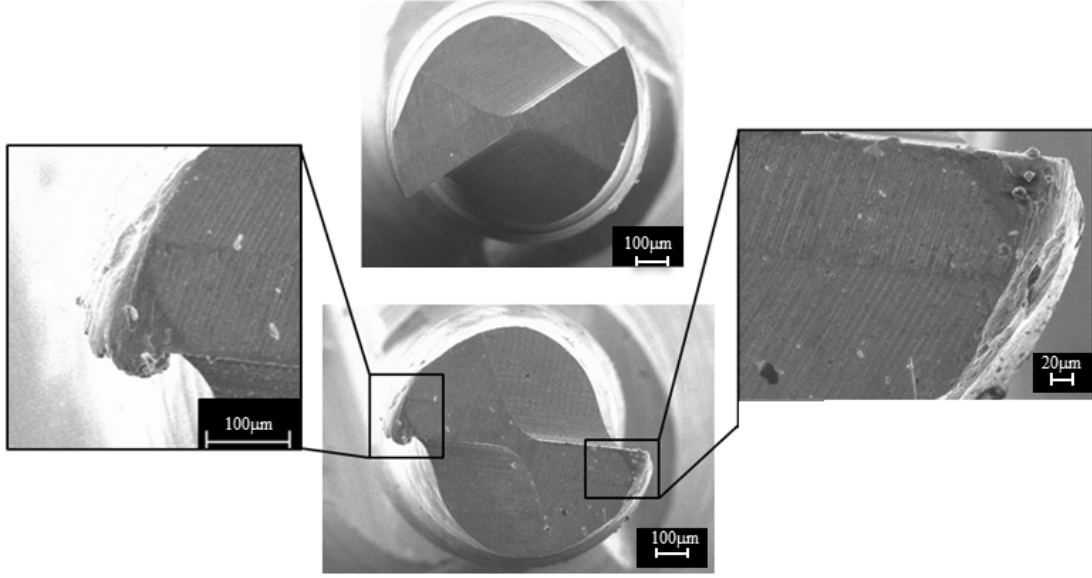
Şekil 6. Mikro frezeleme esnasında meydana gelen kesme kuvvetlerinin kesme uzunluğuna bağlı olarak değişimi (Variation of cutting forces depending on cutting length in micro milling.)



Şekil 7. Ortalama kesme kuvvetlerinin kesme uzunluğuna bağlı olarak değişimi (Variation of average cutting forces depending on cutting length)

İlk kesme anında (kesme mesafesinin sıfıra yaklaştığı kesme uzunluğunda) çapak genişliğinin minimum olduğu görülmektedir. Fakat ilk kanal sonunda (kesme uzunluğu 43mm) çapak genişliği önemli oranda artmıştır. Abrasif aşınma mekanizmasının bir sonucu olarak, takım kenar

radyüsü büyümüştür. Kenar radyüsünün büyümesi, takım ucunun kesme kabiliyetini yitirmesine ve sağlıklı bir kesme işleminin yerine takım, kazınma şeklinde talaş kaldırmaya zorlanır. Bu da kanal kenarlarında çapak oluşumunun artmasına neden olur. Şekil 9'da dikkati çeken bir diğer



Şekil 8. Kesici takımında meydana gelen abrasif aşınma ve talaş yapışması
(Abrasive wear and built - up edge formation on the cutting tool.)

unsur ise; çapak genişliği dalgalı bir seyir izlemektedir. Örneğin 2. kanalın başlangıcında ($L_c=86\text{mm}$) çapak genişliği minimum seviyede iken 2. kanalın sonunda çapak genişliğinin arttığı görülmektedir. Çapak genişliğinin bu şekilde bir seyir izlemesinin altında yatan neden; takımın çevresel olduğu kadar aksel olarak da aşınmasıdır. Aksel aşınma kenar radyüsünün azalmasına ve bu da çapak boyutunun azalmasına katkıda bulunmaktadır. Bu mekanizmanın detaylı açıklaması, yazarların daha önceki çalışmasında yer almaktadır [19].

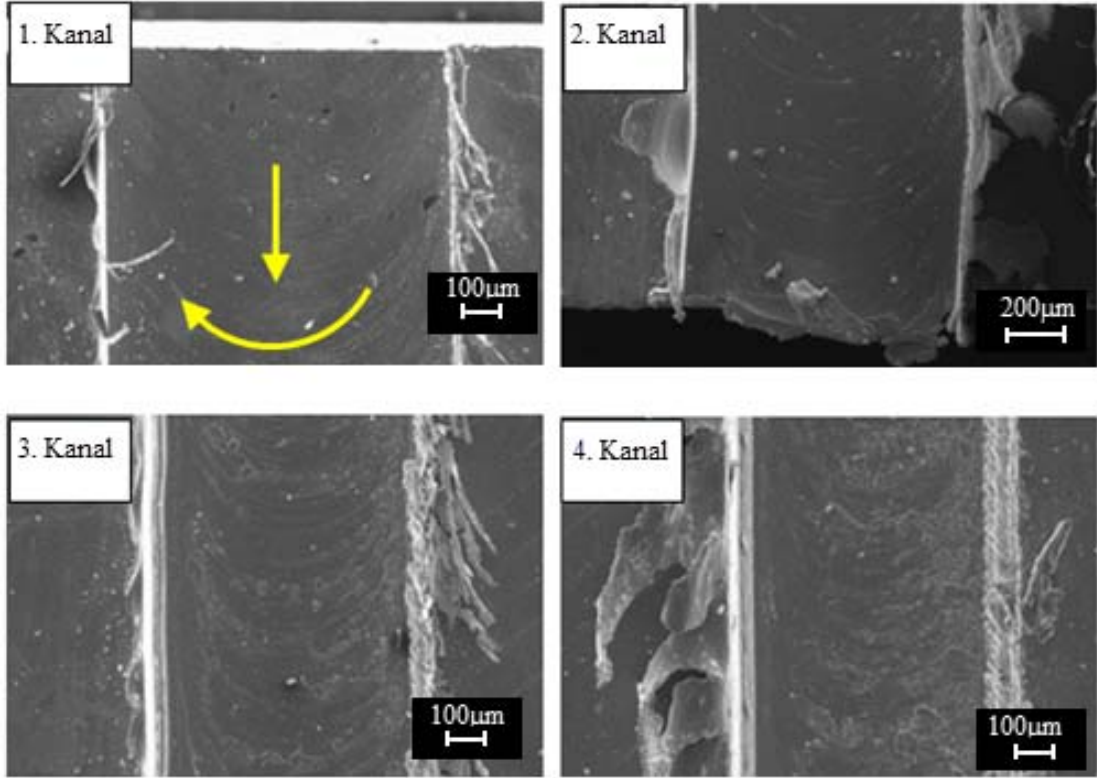
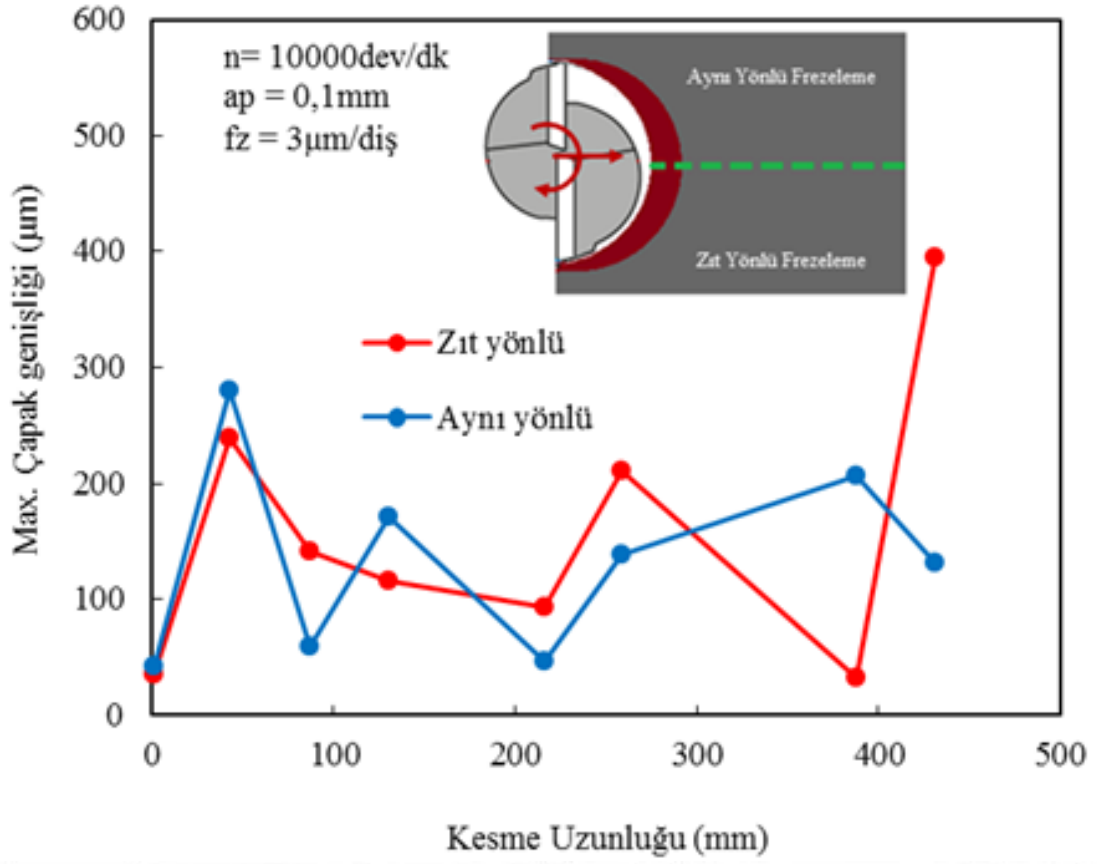
3.3. Kanal Boyutlarındaki Değişim ve Takım Aşınması (Variation of Slot Dimensions and Tool Wear)

Mikro işlemede, kesici takımında meydana gelen aşınma ve talaşın takıma yapışması, iş parçası geometrisini doğrudan etkilemektedir. Özellikle abrasif aşınma mekanizması sonucu takım çapında meydana gelen azalma kanal geometrisinin de değişmesine neden olacaktır. Şekil 10'da dört kanalın sonunda (takımın iş parçasından çıktığı noktada) kanal genişliğinin (W) ve kanala ait kenar radyüsünün (R_s) tespiti için elde edilen SEM görüntüleri verilmiştir. Şekil 11'de ise kesme işlemi sonrasında kesici takımında meydana gelen aşınmanın gösterildiği optik mikroskop resimleri verilmiştir. İlk kanal için ölçülen kanal genişliğinin takım çapından bir miktar büyük olduğu görülmektedir. Bunun nedeni; takımında var olan radyal sapmadır. Ayrıca kesici ağızlarında meydana gelen aşınmanın da aynı oranda olmaması diğer bir nedendir. Artan kesme mesafesi ile birlikte kanal genişliğinin azaldığı ve bununla birlikte kanal kenar radyüsünün de arttığı tespit edilmiştir. Abrasif aşınma sonucunda kesici takım çevresel olarak aşınmakla birlikte kenar radyüsü de büyümektedir. Aslında çevresel aşınma sonucunda takım çapının küçülmesi ile kenar radyüsünün büyümesi birbirini etkileyen iki geometrik değişimdir. Takım çapındaki azalma sonucunda kanal genişliği de azalmaktadır. Takım kenar radyüsünün artması ise hem

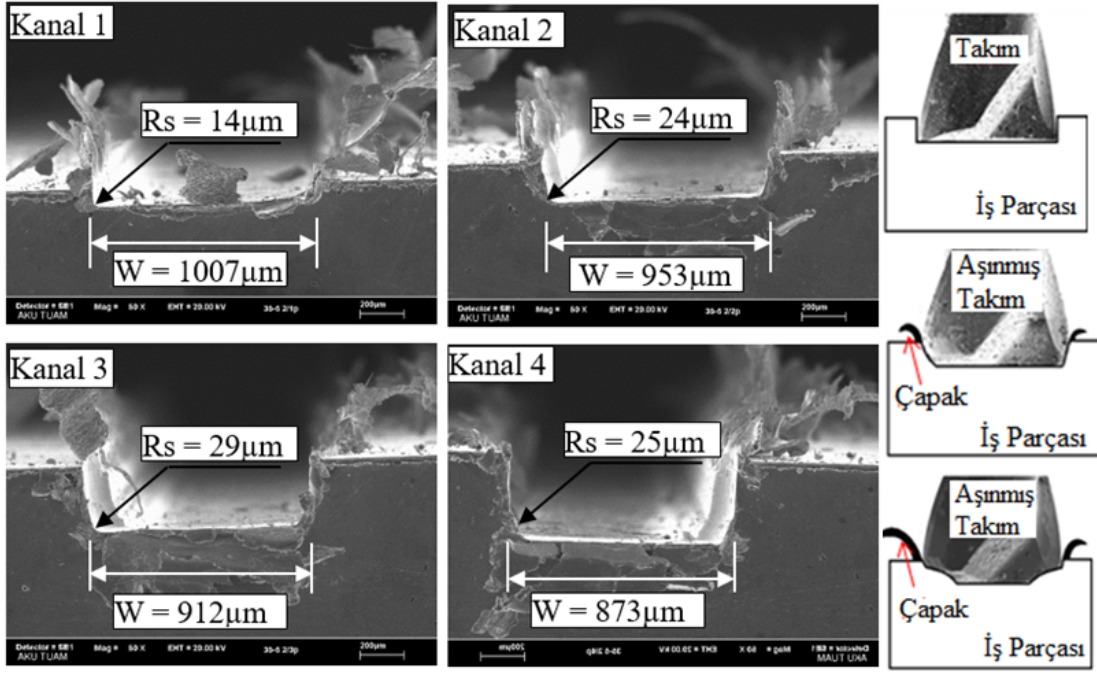
kanal radyüsünün hem de çapak boyutlarının artmasına neden olmaktadır. Şekil 10'da verilen kanal genişlikleri ile Şekil 11'de ki takım çapları birbiri ile kıyaslandığında, $W \approx D_1$ olduğunu söylemek mümkündür. Şekil 10'da kanal III ile kanal IV arasındaki R_s değerlerinde bir azalmanın olduğu görülmektedir. Bunun nedeni; kesici takımında meydana gelen aksel aşınmadır. Aksel aşınmanın bir sonucu olarak takım boyundaki abrasif aşınma kesici kenar radyüsünün küçülmesine neden olmaktadır. Bu durum kesici takımında kenar ikizlemesine neden olmaktadır. Bu da hem kanal kenarlarında hem de takımın çıkış noktasında çapak boyutlarının artmasına neden olmaktadır. Bu durumun şematik bir ifadesi yine Şekil 10'da verilmiştir.

3.4. Yüzey Kalitesi (Surface Quality)

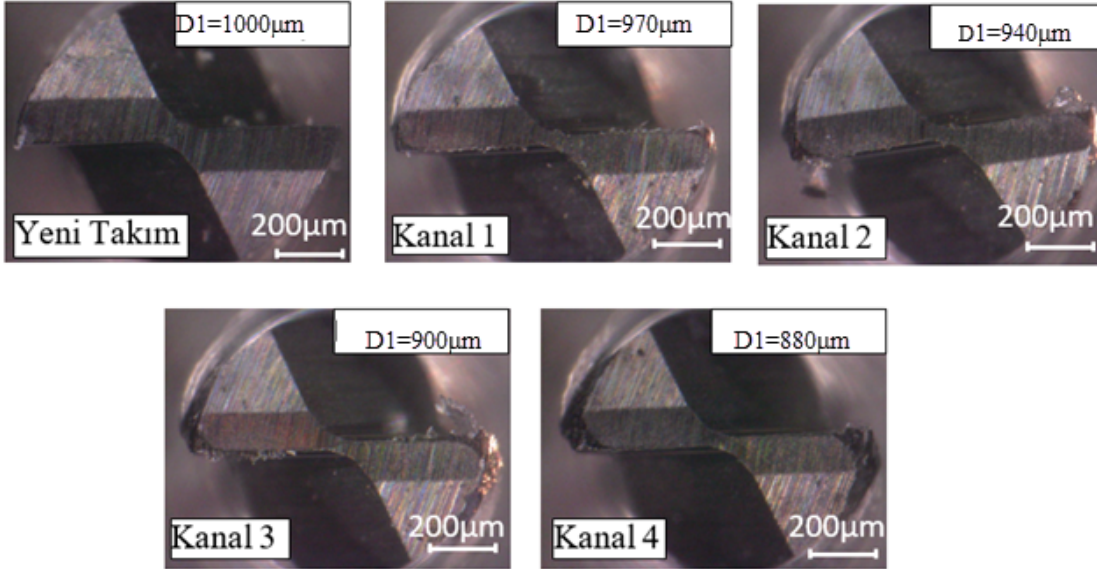
Mikro işlemede takımında meydana gelen aşınma çok küçük boyutlarda da olsa hem yüzey kalitesini hem de çapak boyutunu etkilemektedir. Genellikle işlenen geometri/kanalın çok küçük olması nedeniyle ortalama bir R_a değeri dikkate alınarak değerlendirme yapılır. Bu çalışmada optik bir profilometre kullanılarak, 1mm olan kanal genişliği boyunca beş farklı noktadan ortalama yüzey pürüzlülüğü ölçümü yapılmıştır. Kanal genişliğinin ilk $300\mu\text{m}$ ve son $300\mu\text{m}$ 'luk mesafeler özellikle renklendirilerek, aynı yönlü ve zıt yönlü kesmenin farkı ortaya konulmaya çalışılmıştır. Şekil 12'de hem kanal genişliği boyunca R_a değerlerinin değişimi hem de kesme mesafesiyle değişimi verilmiştir. Kanal genişliği boyunca R_a değerlerinin aynı olmadığını söylemek mümkün. Yazarların daha önceki bir çalışmasında da [18], Ti-6Al-4V alaşımı için benzer bir sonuç elde edilmiş olup, özellikle zıt yönlü frezeleme yönünde R_a değerlerinin daha yüksek olduğu saptanmıştır. Şekil 12'de de ilk üç kanal için elde edilen R_a değerleri zıt yönlü kesmede daha yüksektir. Buna karşın aynı yönlü frezeleme yönünde ilk üç kanal için R_a değerleri birbirine çok yakındır.



Şekil 9. Maksimum çapak genişliğinin kesme uzunluğunca değişimi ve her kanala ait SEM görüntüleri
(The variation of the maximum burr width with the cutting length and SEM images of each machined slot.)



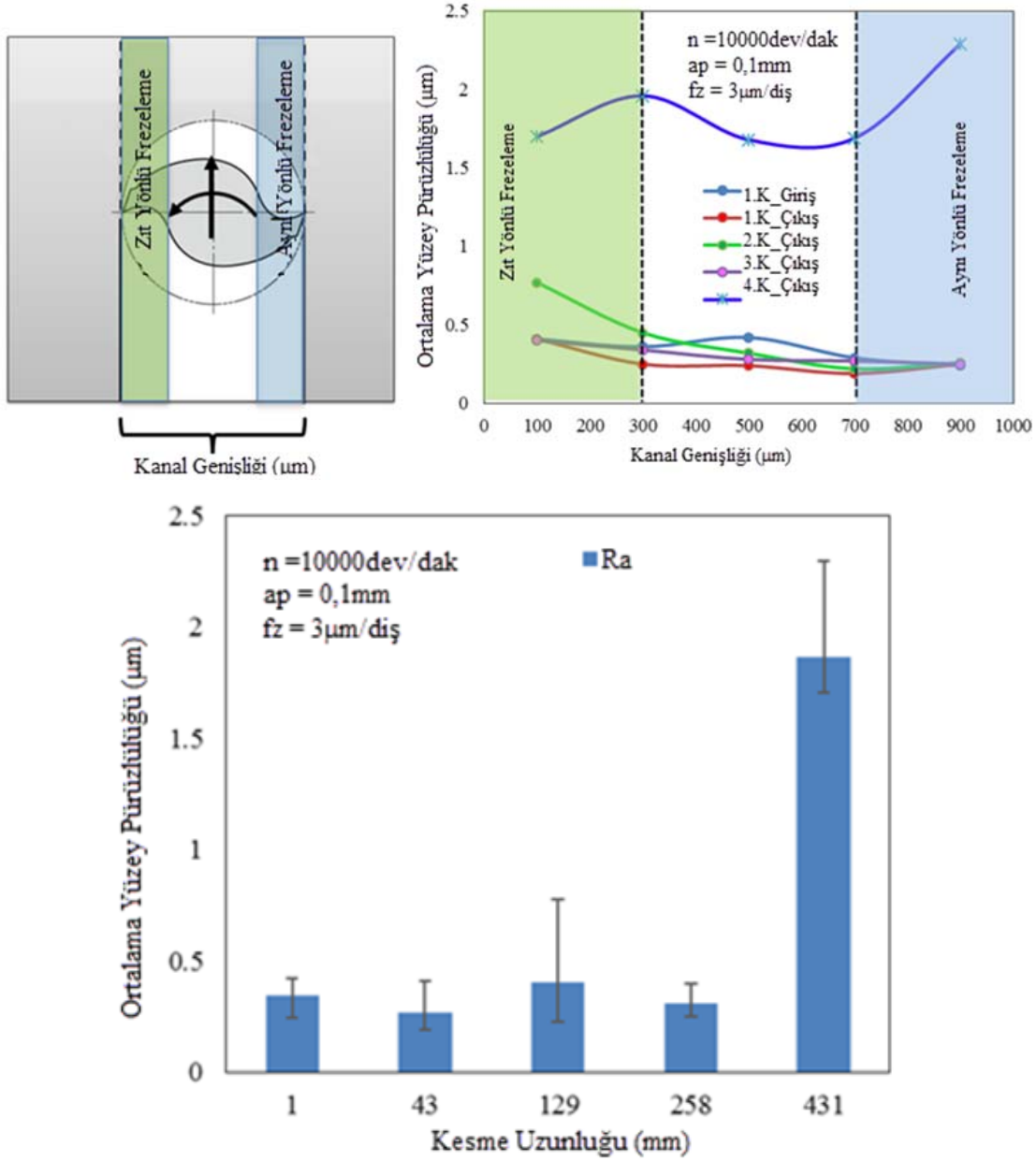
Şekil 10. Kanal çıkış noktalarının SEM görüntüleri Takım aşınmasının kanal geometrisi ve çapak boyutu üzerindeki etkisinin şematik ifadesi (Rs Kanala ait kenar radyüsü W Kanal genişliği). (SEM images of slot exit point. Schematic presentation of the effect of tool wear on slot geometry and burr size Rs:Slot edge radius, W:Slot width)



Şekil 11. Takımın kullanılmadan önceki ve her kanal sonundaki aşınma miktarına ait optik fotoğraflar. (Optical pictures showing the amount of wear before the tool is used and at the end of each slot.)

Özellikle 4.kanal da Ra değerleri önemli bir artış göstermekte ve maksimum Ra değeri de aynı yönlü frezleme tarafında elde edilmiştir. Takımdaki aşınma, hem maksimum çapak genişliğinin meydana geldiği yönün, hem de maksimum yüzey pürüzlülüğünün meydana geldiği kesme yönünün değişmesine neden olmuştur. Şekil 13'te kanal girişi ve çıkışından alınan SEM görüntüleri üç boyutlu yüzey topoğrafyaları verilmektedir. Şekil 13'ten de görüldüğü üzere, ilk kanalın girişinde takım aşınması

minimum düzeyde olması nedeniyle hem çapak oluşumu minimum seviyede hem de yüzey pürüzsüz. Kesme izleri net olarak görülebilmekle beraber yüzeye ait elde edilen ortalama Ra değeri olarak ölçülmüştür. Bununla birlikte, yüzeyde talaş yapışması minimum düzeyde olması da kesme işleminin sağlıklı gerçekleştiğinin bir göstergesidir. 1, 2 ve 3 nolu kanallar ile 4 nolu kanallar arasında önemli bir fark ise maksimum çapağın meydana geldiği kenarın yer değiştirmesidir. Diğer bir ayırt edici faktör ise yüzeyde



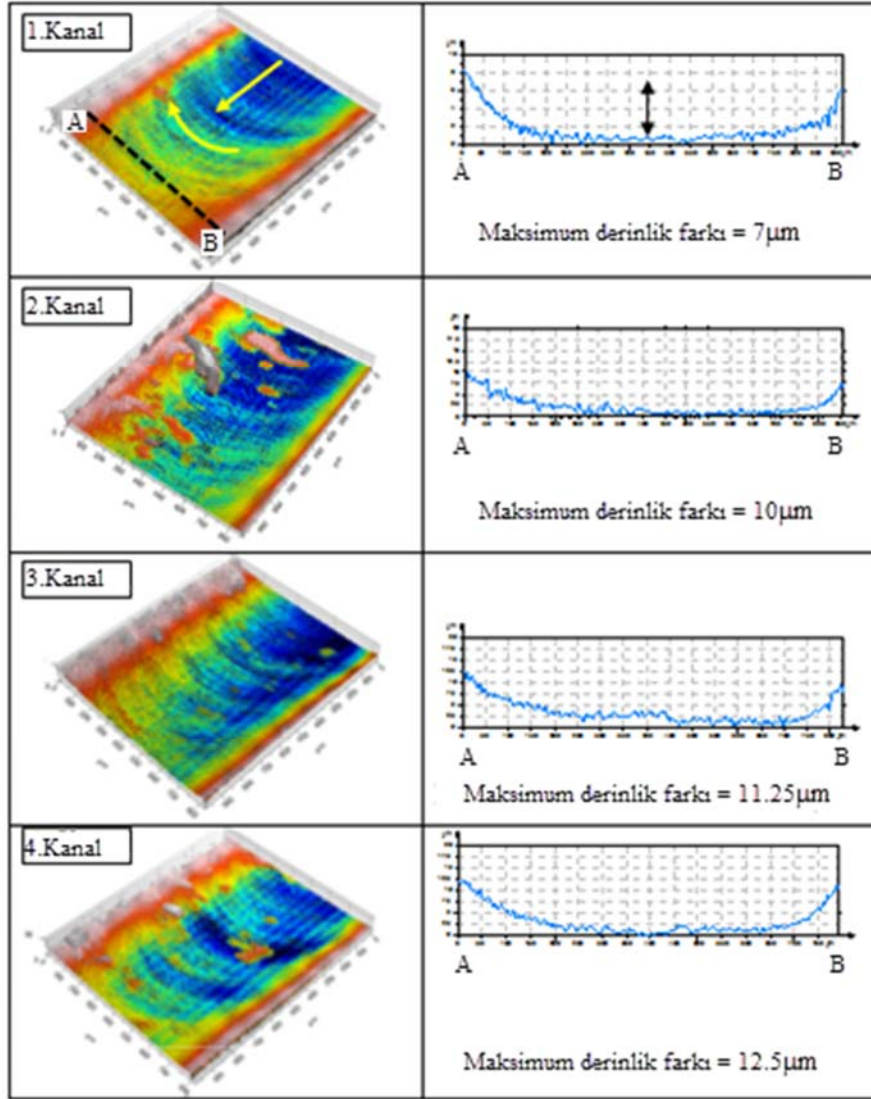
Şekil 12. Kanal genişliği boyunca ve kesme uzunluğuna bağlı olarak ortalama yüzey pürüzlülüğünün değişimi.
(Variation of the average surface roughness along the slot width and depending on the cutting length.)

meydana gelen talaş yapışmasıdır. Kesme uzunluğunun artmasıyla birlikte, talaş yapışması aynı yönlü kesme kenarında daha yoğun olarak gerçekleşmektedir.

4. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULT AND DISCUSSIONS)

µm Inconel 718 süper alaşımının mikro şartlarda işlenmesi sırasında takım çevresinde meydana gelen abrasif aşınma (çevresel aşınma) takım çapını ve kenar radyüsünü doğrudan etkilemektedir. Çevresel aşınma, takım çapını azaltıp kenar radyüsünün de artmasına neden olur. Çevresel aşınmanın yanı sıra takımda meydana gelen aksel aşınma, kenar radyüsünün küçülmesine kısmen de olsa katkı sağladığından

elde edilen ortalama yüzey pürüzlülük değerleri değişkenlik göstermektedir. Bunun sonucunda artan kesme mesafesiyle Ra değeri kimi zaman artmakta kimi zaman azalmaktadır. Özellikle takım çapındaki azalmaya ve kesici geometrisinin bozulmaya başlaması ile birlikte kesme işleminin daha da zorlaştığını, artan kesme kuvvetlerinden anlamak çokta zor değildir. Kesme kuvvetlerinin artmasına zemin teşkil eden temel unsurlardan biride çevresel aşınma ile kenar radyüsünün büyümesidir. Artan kenar radyüsü negatif talaş etkisi oluşturacağından, kesici takımın talaşa dalması zorlaşacaktır. Bu durum, beraberinde kayma mekanizması yerine kazınma mekanizmasının baskın olduğu kesme işlemine yol açmaktadır. Ayrıca abrasif aşınma sonucunda kesici takımın her iki kesici ağzına verilen aksel boşluk



Şekil 13. Her kanal için elde edilen 3 boyutlu yüzey topoğrafya örnekleri ve kanal genişliği boyunca derinlik değişimi.
(Examples of 3D surface topography obtained for each slot and depth variation along the slot width.)

açısının (8°) azalması ile birlikte takım - işparçası temas yüzeyi artmaktadır. Artan temas yüzeyi de özellikle Fz kuvvetlerinin artmasına neden olmuştur.

Çevresel aşınma sonucunda, takım çapındaki azalma kanal genişliğinin de değişmesine neden olmaktadır. İlk kanal sonunda meydana gelen aşınma, önemli boyutta olmadığından, ilk kanalın genişliği de takım çapına (1mm) yakındır. Fakat artan kesme mesafesi ile birlikte ölçülen takım çapı ile kanal genişliği oldukça benzerlik arz etmektedir. Kanala ait kenar radyüsünün de kesme mesafesiyle birlikte arttığı, ama belirli bir kesme uzunluğundan sonra azaldığı gözlemlenmiştir. Bu da kesici takımın sadece çevresel değil aynı zamanda aksel olarak ta aşınmaya zorlandığının bir göstergesidir. Meydana gelen aksel aşınma, bir anlamda hem aksel boşluk açısının hem de kenar radyüsünün azalmasına neden olmuştur. Kenar radyüsündeki bu azalma, kanala ait kenar radyüsünde de azalmaya neden olmuştur. Eğer 3. ve 4. kanallara ait SEM

fotoğrafları beraber incelenecek olursa, kanal radyüsündeki azalma net olarak görülecektir. Çevresel aşınmanın yanı sıra aksel aşınmanın meydana geldiğini gösteren diğer bir sonuçta kanal derinliğinin değişken olmasıdır. Yapılan üç boyutlu profilometre analizlerinde kanal genişliği boyunca işlenen yüzeyin düz olmayıp, kavisli bir forma sahip olduğu tespit edilmiştir. Bir anlamda kanalın orta kısmından kaldırılan talaş derinliğinin kenar kısımlarda kaldırılan talaş derinliğinden daha yüksek olduğu sonucu çıkmaktadır. Bu da, kesici takımın ağız yapısının aksel olarak dengeli aşınmadığını göstermektedir.

4. kanal sonunda Ra değerinin yüksek olmasının altında takım çapında meydana gelen %12 azalma ile kenar radyüsünde %78 lik artış yatmaktadır. Kesme işlemi sağlıklı gerçekleşmediğinden, diğer bir ifadeyle kazanma etkisi daha baskın olduğundan, işlenen kanal yüzeyinde önemli bir talaş yapışması da meydana gelmiştir. Özellikle aynı yönlü frezeleme kenarında sağlıklı bir kesmenin meydana

gelmediğini net olarak söylemek mümkün. Takım bir önceki pasoda kesemediği talaşı bir sonraki pasoda da kesemediğinden kenara yığarak ilerlemiştir. Bu nedenle aynı yönlü kesme kenarında testere formunda bir talaş yığılması meydana gelmiştir. Yine artan kesme uzunluğuna bağlı olarak maksimum çapağın meydana geldiği kenarda değişmektedir. İlk üç kanalda maksimum çapak genişliği aynı yönlü kesme kenarında meydana gelirken, son kanalda zıt yönlü kesme kenarında çapak genişliği maksimumdur. Abrasif aşınma mekanizmasının etkisiyle, takım geometrisi ciddi şekilde bozulmuş olup, takımın hem talaşa girdiği hem de talaştan ayrıldığı bölgelerde kazınma ve talaş yığılma gibi problemler meydana gelmiştir.

5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Inconel 718 süper alaşımının, mikro frezeleme sırasında, takımda meydana gelen aşınmanın kanal geometrisi, yüzey kalitesi ve çapak oluşumu üzerindeki etkisi bu çalışmayla ortaya konulmaya çalışılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, abrasif aşınma mekanizmasının etkisiyle, kesici takım hem çevresel hem de aksel olarak aşınmaktadır. Çevresel aşınma, takım çapının azalmasına neden olurken, aksel aşınma kanal derinliğinin değişmesine neden olmaktadır. Takımda meydana gelen aşınma, takım geometrisinin (özellikle de kenar radyüsünü) bozulmasına neden olduğundan, artan kesme uzunluğuna bağlı olarak da kesme kuvvetleri artmaktadır. Abrasif aşınma sonucunda takıma ait aksel ve radyal boşluk açıları sıfıra yaklaşırken, takımın kesme kabiliyeti de düşmektedir. Çünkü takımın boşluk açılarının değişmesine paralel olarak kenar radyüsü de artmaktadır. Böylece kesici takımın iş parçasına dalması zorlaşmaktadır. Bu da hem kazınma bölgesinin hem de çapak genişliğinin artmasına neden olmaktadır. Takım çapındaki küçülmeye ve kenar radyüsündeki büyümeye bağlı olarak, kanal geometrisinin boyutları da değişmektedir. Artan kesme uzunluğu ile birlikte çevresel aşınma daha baskın olduğundan kanal genişliğindeki azalma, kanal derinliğindeki değişime nazaran daha büyüktür. Kanal genişliği boyunca ortalama yüzey pürüzlülük değerinin değiştiği saptanmış olup, özellikle takımın iş parçasını terk ettiği kesme yönü olan zıt yönlü frezelemede Ra değerlerinin daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENT)

Bu çalışma, 213M572 no'lu TÜBİTAK 1001 projesi kapsamında desteklenmiştir. Desteklerinden dolayı TÜBİTAK'a teşekkürlerimizi sunarız.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. De Chiffre L., Kunzmann H., Peggs G.N., Lucca D.A., Surfaces in Precision Engineering, Microengineering and Nanotechnology Annals of the CIRP, 52 (2), 561–577, 2003.
2. Altıng L., Kimura F., Hansen H.N., Bissacco G., Micro Engineering, Annals of CIRP, 52 (2), 635-657, 2003.
3. Dhanorker A., Özel T., Meso/Micro Scale Milling for Micro-Manufacturing, International Journal of Mechatronics and Manufacturing Systems, 1 (1), 23-42, 2008.
4. Masuzawa T., State of the Art of Micromachining, Annals of CIRP, 49 (2), 473–488, 2000.
5. Chae J., Park S.S., Freiheit T., Investigation of Micro-Cutting Operations, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 46, 313-332, 2006.
6. Li C., Lai X., Li J.N., Modeling of Three-Dimensional Cutting Forces in Micro-End-Milling, Journal of Micromechanics and Microengineering, 17, 671-678, 2007.
7. Zhu K., Wong Y.S., Hong G.S., Multi-Category Micro-Milling Tool Wear Monitoring with Continuous Hidden Markov Models. Mechanical Systems and Signal Processing, 23, 547– 560, 2009.
8. Heamawatanachai S., Bamberg E., Design and Characterization of a PZT Driven Micromachining Tool Based on Single-Point Tool Tip Geometry, Precision Engineering, 33, 387-394, 2009.
9. Vogler M.P., DeVor R.E., Kapoor S.G., On the Modeling and Analysis of Machining Performance in Micro Endmilling Part I: Surface generation, ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering, 126, 685-694, 2004.
10. Bao W.Y., Tansel I.N., Modeling Micro-End-Milling Operations. Part I: Analytical Cutting Force Model, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 40, 2155-2173, 2000.
11. Kang I.S., Kim J.S., Kim J.H., Kang M.C., Seo Y.W., A Mechanistic Model of Cutting Force in the Micro End Milling Process, Journal of Materials Processing Technology, 187-188, 250-255, 2007.
12. Shimada S., Ikawa N., Tanaka H., Ohmori G., Uchikoshi J., Molecular Dynamics Analysis of Cutting Force and Chip Formation Process in Microcutting, Journal of the Japan Society for Precision Engineering, 59 (12), 2015-2021, 1993.
13. Yuan Z.J., Zhou M., Dong S., Effect of Diamond Tool Sharpness on Minimum Cutting Thickness and Cutting Surface Integrity in Ultra Precision Machining, Journal of Materials Processing Technology, 62 (4), 327-330, 1996.
14. Kim C.J., Bono M., Ni J., Experimental Analysis of Chip Formation in Micro Milling, Transactions of the North American Manufacturing Research Institute of SME, 30, 247-254, 2002.
15. Aslantas K., Ekici E., Çiçek A., Optimization of process parameters for micro milling of Ti-6Al-4V alloy using Taguchi-based gray relational analysis, Measurement: Journal of the International Measurement Confederation, 128, 419-427, 2018.
16. Li P., Micromilling of Hardened Tool Steels, Technical University of Delft, PhD Thesis, 160p, Delft, 2009.
17. Aslantas K., Hopa H.E., Percin H., Uçun İ., Çiçek A., Cutting performance of nano-crystalline diamond

- (NCD) coating in micro-milling of Ti 6 Al 4 V alloy, Precision Engineering, 45 (1), 55-66, 2016.
- 18.** Korkut İ., Dönertaş M.A., Kesme parametrelerinin frezelemede oluşan kesme kuvvetleri üzerine etkileri, Politeknik Dergisi, 6 (1),385-389, 2003.
- 19.** Uçun İ., Aslantaş K., Bedir F., An experimental investigation of the effect of coating material on tool wear in micro milling of Inconel 718 super alloy, Wear, 300 (1-2), 8-19, 2013.