

## Al6061 T256 Alaşımının Mikro-Frezelenmesinde Üst Çapak Oluşumunun ve Temizlenmesinin Deneysel İncelenmesi

*Experimental Investigation on the Top Burr Formation and Its' Removal in Micro-Milling of Al6061 T256 Alloy*

Ferah SUCULARLI<sup>1</sup> 

<sup>1</sup>ASELSAN A.Ş., REHİS, Ankara, Türkiye

### Öz

Metal parçaların mikro-frezelenmesinde oluşan çapak parçanın işlevini olumsuz etkilemekte olup temizlenmesi oldukça zor veya çoğu zaman imkansızdır. Bu çalışmada Al6061 T256 alüminyum alaşımının farklı işleme koşullarında (değişken diş başı ilerlemesi ve işleme (kanal) derinliği için) kanal mikro-frezelenmesi sonucunda eş-yönlü frezeleme tarafı (EYFT) üstünde oluşan üst çapağının ortalama yüksekliğinin değişimi deneysel olarak işlenmiştir. Değişik işleme koşullarında EYFT'nde oluşan üst çapağının mikro-frezelenme ile temizlenebilmesi için değişik radyal derinlik (RD) kullanılarak (10, 15 ve 20 µm) zıt-yönlü frezeleme yapılmıştır. Deneysel olarak oluşan çapağın sürekli yapıda olduğu, yüksekliğinin kanal boyunca değişim gösterdiği ve Poisson tipi olduğu görülmüştür. RD=15 µm değerinin oluşan çapağı önemli ölçüde (çapak yüksekliğini %80-84 mertebesinde) temizlediği, daha yüksek RD kullanımının çapak temizlemede fazla etkili olmadığı tespit edilmiştir.

**Anahtar kelimeler:** mikro-frezelenme, çapak oluşumu, üst çapak yüksekliği, çapak temizleme, Al6061 T256 alaşımı

### Abstract

The burr formed in the micro-milling of metal parts adversely affects the function of the part and is very difficult or often impossible to remove. In this study, the variation of the average height of the top burr formed on the down-milling side (DMS) as a result of channel micro-milling of Al6061 T256 aluminum alloy under different machining conditions (for varying feed per tooth and milling (channel) depth settings) was experimentally investigated. Up-milling operations were performed at different radial depth (RD) values (10, 15 and 20 µm) so that the upper burr formed in the DMS under different machining conditions could be removed by micro-milling. It was found that the burr formed in the experiments was continuous, its height varied along the channel and it was Poisson type. It was determined that the RD=15 µm value significantly removes the formed burr (reducing the burr height by 80-84%), and the use of the higher RD was not further effective in burr removal.

**Keywords:** micro-milling, burr formation, top burr height, burr removal, Al6061 T256 alloy

## I. GİRİŞ

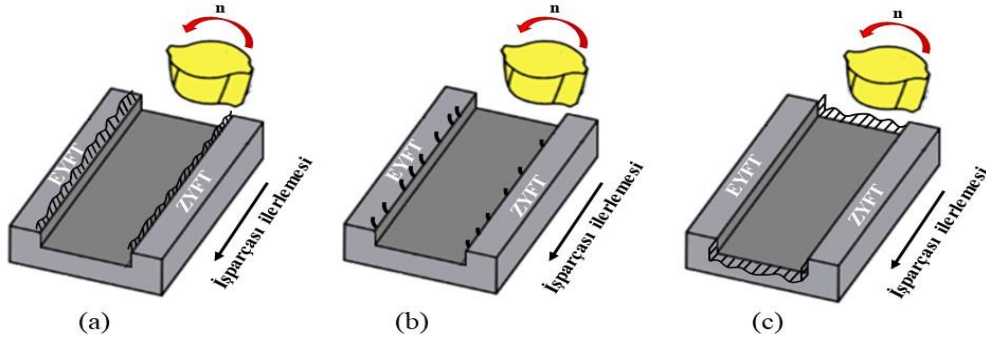
Çapak, takım tarafından kesilmemiş talaşın tamamen kaldırılması yerine plastik olarak deforme edilerek malzeme üzerinde yapışık kalmasından oluşmaktadır. Çapak oluşumunu artıran önemli etkenler şunlardır: a) Kesilmemiş talaşın ana malzeme ile desteklenmemesi [1], b) kesici ağız yarıçapının ve sürtme (ploughing) etkisinin büyük olması [2, 3], c) takım yarıçapında belirgin değişkenlik (tool run-out) [2, 3], d) takımın titreşim ve tırlama (chattering) [4-6], e) aşınmış kesici takım [7-9].

Mikro-frezelenme (MF) işlemlerinde üç tip çapak oluşum mekanizması görülmektedir [10-13]. Poisson mekanizmasında malzeme sürtme etkisi altında sıkışır ve plastik deformasyon etkisiyle malzemenin üst yanlarına (özellikle eş-yönlü frezeleme tarafına (EYFT)) yığılır (üst çapağı, Şekil 1a). Yırtılma mekanizmasında kesilmemiş talaş malzemeden yırtılır ancak kopmaz (yırtılma çapağı, Şekil 1b). Sıvanma mekanizmasında kesilmemiş talaş takımın malzemeye girmesi-çıkması sırasında işlenmiş duvara ve tabana sıvanır (sıvanma çapağı, Şekil 1c). Çapak çok sıklıkla işlenmiş bölgenin üst yüzeylerinde üst çapağı olarak görülse de sıvanma çapağı olarak da nadiren rastlanmaktadır. Yırtılma çapağı oluşumu ise daha nadirdir.

MF'de geometrik bozukluklardan biri olan çapak oluşumu temizlenmesindeki zorluklar nedeniyle önemli bir problemdir [14, 15]. Oluşan çapağın boyutları işlemede kullanılan kesici takım çapı ile orantılandığında klasik frezelemeye göre oldukça büyük olup [8] işlenmiş parçanın işlevini olumsuz etkileyebilmektedir [14, 16]. Çapak oluşumunun en aza indirilmesinde işleme parametrelerinin doğru seçimi çapak temizleme maliyetini ve süresini kısaltmakta, ayrıca çapak temizleme sırasında parçada oluşabilecek boyutsal hataları, mikro hasarları, yüzey bozulmalarını ve kalıcı gerilmeleri ortadan önemli ölçüde kaldırmaktadır [17].

**Sorumlu yazar:** Ferah SUCULARLI, Tel: 0312 592 60 00, e-posta: ferahco@hotmail.com

**Gönderilme:** 06.08.2022, **Düzenleme:** 04.11.2022, **Kabul:** 24.11.2022



Şekil 1. Çapak tipleri. a) Poisson çapağı, b) yırtılma çapağı, c) sıvanma çapağı

MF’de metal işparçalarında işleme parametrelerinin değişimi ile çapak oluşumunun en aza indirilmesi üzerine yapılan araştırmalarda (AISI 316L [2], Ti6Al4V [7], AA1100 [8], Al6061-T6 [17], oxygen-free high copper (OFHC) [18], Inconel 718 [19], AISI 1045 [20], X5CrNi18-10 [21]) zıt-yönlü frezeleme tarafında (ZYFT) daha az çapak oluşumu görüldüğü ifade edilmiştir. Hajiahmadi çalışmasında [22] zıt-yönlü frezelemede (ZYF) eş-yönlü frezelemeye (EYF) göre üst çapak yüksekliğinin daha az, buna karşın üst çapak genişliğinin daha fazla olduğunu göstermiştir. Mian ve ark. [19] ise EYF’de oluşan üst çapağının ZYF’ye göre geometrik olarak daha homojen yayıldığını belirtmişlerdir. Ayrıca, üst çapağın kök kalınlığının (parçaya bağlandığı bölgedeki kalınlık) kesme hızının ve “kesilmemiş talaş kalınlığı/kesici kenar yarıçapı” oranının optimize edilmesi ile kontrol edilebileceğini ifade etmişlerdir. Aramcharoen ve Mativenga [23] AISI H13 çeliğinde “kesilmemiş talaş kalınlığı/kesici kenar yarıçapı” oranı arttıkça çapak boyutunun azaldığını belirtmişler ve bu oluşumu sürtme etkisinin azalması ile açıklamışlardır. Piquard ve ark. [24] ise takım diş başı ilerlemesinin ( $f_z$ ) ve işleme genişliğinin çapak boyutunu etkilediğini göstermiştir. Chen ve ark. [25] çapak boyutunun azaltılması için “işleme derinliği/takım çapı” oranının azaltılmasını önermişlerdir. Diğer bir çalışmada [20], kesme hızı ( $V_c$ ) ve  $f_z$  değerlerinin artırılmasının çapak oluşumunu azaltmada etkili olduğu ( $V_c=40-90$  m/dak ve  $f_z=1-4$   $\mu$ m aralıkları için) vurgulanmıştır.

Saptaji ve Subbiah [17] ve Biermann ve Steiner [21] deneysel olarak mikro frezelenmiş yan duvarların kalitesinin ZYF’ye göre EYF’de daha iyi ancak üst çapak yüksekliğinin daha fazla olduğunu göstermişlerdir. Wu ark [18] 100  $\mu$ m çaplı mikro freze ile 70  $\mu$ m genişliğinde 1-11  $\mu$ m derinliğinde işlemler yaptıkları çalışmalarında, ağırlıklı olarak Poisson çapağının oluştuğunu, üst çapak oluşumunu en aza indirmek için takımın kesici ağız yarıçapı ile  $f_z$  değerinin birbirine yakın olması gerektiğini vurgulamışlardır. Çalışmada çapak yüksekliğinin tespiti için SEM görüntülerinde her bir işleme boyunca en yüksek beş çapağın yüksekliğinin ortalaması alınmıştır. EYFT’nda daha yüksek üst talaş

oluşturduğunu, bu çapağı temizleme için zıt-yönlü frezeleme ile düşük bir radyal derinlik verilerek talaş kaldırmanın (100  $\mu$ m genişliğindeki kanalda oluşan üst çapağı temizleme için 10  $\mu$ m radyal derinlik (RD)) gerekliliğini belirtmiştir. Kiswanto ve ark. [8] ve Kumar ve ark [14] takım çıkış bölgesindeki sıvanma çapaklarının yoğun olarak EYFT’nda görüldüğünü, Gilbin ve ark [26] yaptıkları optimizasyon çalışmasında bu tip çapağın oluşmaması için ilerleme hızının artırılması gerektiğini ve bu artışın yüzey pürüzlülüğünü fazla etkilemediğini (makro-frezelemede olduğundan farklı olarak) belirtmişlerdir. Biermann ve Steiner’in çalışmasında [21] ise ilerleme hızının artırılmasının üst çapak oluşumunu artırdığı sonucuna varmıştır. Buna karşın, pozitif talaş açılı ve büyük spiral açılı takım ve yüksek kesme hızı kullanmanın (malzemenin hızlı pекleşmesini sağlayarak) üst çapak yüksekliğini azalttığını belirtmişlerdir. Aramcharoen ve ark. [27] ve Swain ve ark. [28] AISI H13 çelik ve Ni-Cr (Nimonic 75) alaşımının mikro frezelenmesinde kaplamalı takımların, kısa süreli işlemlerde kaplamasız takımlara göre aynı çapak oluşum karakteristikleri gösterdiğini ifade etmişlerdir. Buna karşın, uzun süreli işlemlerde kaplamalı takım aşınmasının daha az olması nedeniyle kaplamasız takıma göre daha az üst çapağı oluşturduğunu gözlemlemişlerdir. Kou ve ark [29] takımın malzemenin çıkış yüzeylerinde görülen sıvanma tipi talaşın oluşumunu azaltmak için malzemenin çıkış bölgesine yapışkan destek malzemesi uygulamış ve başarılı sonuçlar almışlardır. Üst çapağı ve çıkış bölgesi sıvanma çapağı oluşumlarını en aza indirme amaçlı iki optimizasyon çalışmasında [17, 30] konik takım kullanımı oluşan eğimli duvarlar sayesinde olumlu sonuç vermiştir. Kuram çalışmasında [31] mikro freze ile Inconel 718 malzemesine kanallar açmış, kanalları EYF ve ZYF tarafındaki üst çapak genişliğini her kanal için en geniş üç çapağın genişliğinin ortalaması olarak elde etmiştir. Takım bağlama uzunluğu arttıkça takım çap aşınmasının, kesme kuvvetlerinin, çapak genişliğinin (EYF ve ZYF taraflarında) ve çapak sürekliliğinin arttığı görülmüştür. EYFT’ndaki üst çapak genişliğinin ZYFT’na göre daha fazla olduğu tespit edilmiştir.

Literatürde, genelde işleme parametrelerinin (kesme hızı, takım dönüş hızı, ilerleme hızı, takım helis açısı, takım talaş açısı, kesici ağız sayısı, kesici ağız yarıçapı, takım malzemesi, kesici takım bağlama uzunluğu, takım kaplaması, kesme sıvısı kullanımı, vb.) çapak oluşumuna etkisi incelenmiş, daha düşük çapak yüksekliği ve genişliği için işleme parametrelerinin belirlenmesine çalışılmıştır. Ancak, oluşmuş çapağın giderilmesi yönünde çalışmaların çok kısıtlı olduğu ve yapılan çalışmaların sadece birinde oluşmuş çapağın temizlenmesi için bir RD değeri önerildiği (10  $\mu\text{m}$ ) görülmektedir [18]. Ancak, MF'de çapağın yok edilmesi için RD değerlerinin ne olması gerektiği yönünde sistematik bir çalışma yapılmamıştır. Bu çalışmanın amacı çapak oluşumunu en çok etkileyen işleme parametrelerinden işleme derinliğinin ve  $f_z$ 'nin değişik değerlerinde oluşan üst çapağının farklı RD değerlerinde ne seviyede giderilebildiğini belirlemektir. Bu çalışmanın diğer çalışmalara göre önemli deneysel üstünlüğü ise ortalama çapak yükseklik ( $h_{co}$ ) değerlerinin daha doğru olarak bulunmasıdır. Literatürdeki çalışmalarda, SEM veya optik görüntülerdeki en yüksek 3-5 adet çapağın yüksekliğinin (veya genişliğinin) ortalaması kullanılmış olup, bu yaklaşım istatistiksel açıdan çok güvenilir değildir. Bu çalışmada ise her biri 12,5 mm kanal uzunluğundaki SEM görüntüsünün tamamı ImageJ ile sayısallaştırılmış, elde edilen çapak üst profilinin tamamı kullanılarak  $h_{co}$  değerleri çok daha isabetli olarak bulunmuştur. MF uygulamalarında, üst çapak yüksekliğinin parçanın işlevini üst çapak genişliğine göre daha çok bozduğu, üst çapak yüksekliğinin çapak genişliğine göre daha büyük olduğu ve üst çapak oluşumunun kullanıcı için daha yüksek risk oluşturduğu bilindiğinden literatürdeki çalışmaların önemlice bir kısmı üst çapak oluşumu ve en aza indirilmesi yönünde olmuştur. Bu çalışmada da çapak genişliği konusu araştırılmamıştır.

## II. MATERYAL ve METOT

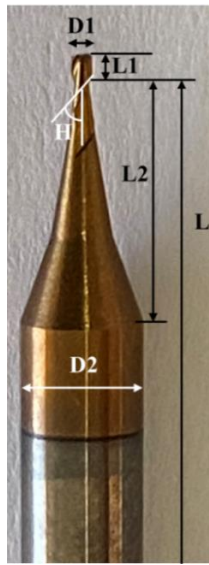
Bu çalışmada kesici takım olarak 670  $\mu\text{m}$  çaplı 2-kanallı karbür mikro freze kullanılmıştır (Şekil 2a). Mikro freze tezgaha 4 mm ER20-4 GFB-4921pens ile bağlanmıştır. Takımın işleme sırasındaki rijitliğini sağlamak için takımın pens dışında kalan boyu mümkün olduğunca kısa tutulmuştur. İşparçası olarak 70x50x14 mm boyutlarında işlenmiş Al6061 T651 numune (Tablo 1) kullanılmıştır. İlk aşamada, üst çapak ortalama yükseklik değerlerinin ( $h_{co}$ ) tespiti için numunelere değişik  $f_z$  ve kanal derinlik ( $h_k$ ) değerlerinde 70 mm boyunda 6 adet kanal açılmıştır (1-6 nolu kanallar, Tablo 2). Konvansiyonel parmak freze ile işlenmiş bir kanalda son frezelemede RD olarak  $d_t$ 'nin %3-%15'i tavsiye edilmekte ise de [32, 33] mikro frezeler için literatürde bu konuda bir bilgi bulunmamaktadır. Sadece Wu ark [18] 100  $\mu\text{m}$  çaplı mikro freze ile işlenmiş kanallarda EYFT'ndeki üst çapağı temizlemek için 10  $\mu\text{m}$ 'lik bir RD değerinin

yeterli olduğunu bahsetmişlerdir. Bu çalışmada ise yapılan ön deneylerden ve banyo tipi kesme sıvısı kullanımı sayesinde çok daha düşük RD değerlerinde çapağın temizlenmesinin gerçekleştirilebileceği öngörülmüştür. Bu nedenlerle kanalların EYFT'nda oluşan üst çapağı yok etmek amacıyla  $h_{co}$  değerinin en yüksek olduğu  $h_k=300 \mu\text{m}$ 'de açılmış 9 adet kanalda 10  $\mu\text{m}$  ( $d_t$ 'nin yaklaşık %1,5'i), 15  $\mu\text{m}$  ( $d_t$ 'nin yaklaşık %2'si) ve 20  $\mu\text{m}$  ( $d_t$ 'nin yaklaşık %3'ü) RD değerlerinde temizleme işlemi yapılmıştır (7-15 nolu kanallar, Tablo 2). Çapak temizleme işlemlerinin yapıldığı 7-15 nolu kanallar 4-6 nolu kanallarla aynı koşullarında işlendiğinden (yani 7-15 nolu kanallarda oluşması beklenen çapak temizleme öncesi üst çapak yükseklikleri ( $h_{co}$ ) 4-6 nolu kanallardan alındığından) ve numunenin tezgahtan sökülüp elektron mikroskopunda (TEM) görüntü alınmasını takiben çapak alma işlemi yapılamayacağından 7-15 nolu kanallar için çapak temizleme öncesi  $h_{co}$  ölçümleri alınmamıştır. Mikro-frezelemede çapak oluşumunun azaltılması için kesici kenar uç yarıçapı ile  $f_z$  değerlerinin yakın olması gerektiği çalışmalarda vurgulanmıştır [18-20, 23, 24]. Bu çalışmada da, kullanılan mikro frezenin kesici kenar uç yarıçapı yaklaşık 5  $\mu\text{m}$  olduğundan deneylerde çapak oluşumunu en aza indirmek için  $f_z$  değerleri 3-7 aralığında (3,13  $\mu\text{m}$ , 5  $\mu\text{m}$  ve 6,88  $\mu\text{m}$  (ilerleme hızı (f) 25, 40 ve 55 mm/dak)) olarak seçilmiştir. Alanda çalışan araştırmacıların ve uygulamacıların araştırma merkezlerindeki ve laboratuvarlarındaki düşük-orta işmili hızı kategorisindeki CNC freze tezgahları için referans oluşturmak amacıyla takım dönüş hızı (n) 4000 dev/dak seçilmiştir. Her numunenin için yeni mikro freze takım kullanılmıştır.

Kanal derinliklerinin kanal boyunca sabit kalmasını sağlamak amacıyla MF öncesinde tablaya bağlama fikstürü yardımıyla (Şekil 2b) bağlanmış numunenin üst yüzeyi 6 mm'lik parmak freze ile tezgah tablasına paralel olarak işlenmiştir. Kanallar arasında 2 mm boşluk bırakılmıştır. Numune, işleme sırasında 23 mm derinliğinde bir hazne içine yerleştirilmiş olup, üst işleme yüzeyinin 4 mm üstünde kalacak şekilde %5 konsantrasyonlu bor yağı su karışımı doldurulmuştur (banyo tipi kesme sıvısı kullanımı). Banyo tipi kesme sıvısı kullanımının sebebi püskürtme ve minimum miktar kesme sıvısı kullanım yaklaşımlarının mikro-ışılama koşullarında yeterli yağlama-soğutma işlevini yerine getirememesidir [21]. İşleme sonrası bir numunenin görüntüsü Şekil 3'de görülmektedir. İşleme deneylerinde ProLIGHT 1000 İşleme merkezi (Light Machines Corp.) kullanılmış olup tezgahın x-, y- ve z-eksen hareket hassasiyeti 1  $\mu\text{m}$ 'dir. Deneyler aynı koşullarda üç numunede tekrarlanmış olup, numuneler için elde edilen  $h_c$ ,  $h_k$  ve kanal genişlik ( $w_k$ ) değerlerinin ortalaması ( $h_{co}$ ,  $h_{ko}$ ,  $w_{ko}$ ) alınmıştır.

İşleme sonrası elde edilen  $w_{ko}$  ve  $h_{ko}$  değerleri mikro frezenin numunelere giriş ve çıkış yaptığı bölgelerdeki optik görüntülerden faydalanılarak bulunmuştur (Şekil 4). Kanal yapısını ve çapak oluşumunu bozmamak için frezelenmiş numunelere kesme işlemi uygulanmamıştır.  $h_{\phi o}$  değerlerinin tespiti için numuneler Thermofisher Scientific Phenom XL model taramalı elektron mikroskobu (TEM) altına  $45^\circ$  eğimli bir fikstür ile bağlanmış ve kanal görüntüleri alınmıştır (Şekil 5a). Görüntüler açık-kaynaklı ImageJ [34] yazılımı ile sayısallaştırılmış, takiben görüntülerdeki çapak yükseklikleri (görünür çapak yüksekliği,  $h_{\phi g}$ )  $\cos 45^\circ$  ( $\approx 0,707$ ) bölünerek gerçek değerler elde edilmiştir. Görüntülerde, kanal yan duvarı (Şekil 5b, B) beyaz renkli ve üzeri siyah benekli olarak, kanal tabanı (Şekil 5b, A) ise açık gri renkli ve üzeri mikro frezenin alt kesici iki ağzının yarattığı dairesel ark

çizgili olarak ayırt edilebilmektedir. Bu görünümsel farklılık kanal tabanı ve kanal duvarı arasındaki kenarın (çizginin) belirlenmesini sağlamaktadır. Çapağın başladığı numune üst yüzey çizgisinin (Şekil 5b, sarı renkli çizgi) belirlenmesinde ise görüntülerde çapak oluşumu gözükmeyen bölgeler (Şekil 5a, kırmızı çember ile temsili gösterilen bölge) kullanılmıştır. Bu çalışmada her biri 12,5 mm kanal uzunluğundaki SEM görüntüleri ImageJ ile sayısallaştırılarak hesaplama yapıldığından literatürdeki kısıtlı sayıda çalışmaya göre  $h_{\phi o}$  değerleri çok daha doğru olarak bulunmuştur (Şekil 5b). Tablo 2’de 45 adet numuneden elde edilen ölçümlerin minimum ve maksimum değerleri de ( $h_{\phi min}$ ,  $h_{\phi mak}$ ,  $h_{kmin}$ ,  $h_{kmax}$ ,  $w_{kmin}$ ,  $w_{kmax}$ ) sunulmuştur.

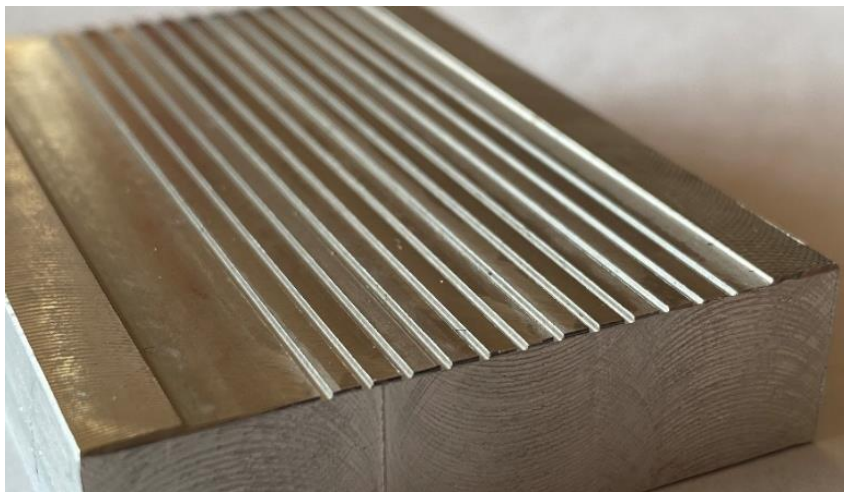


(a)

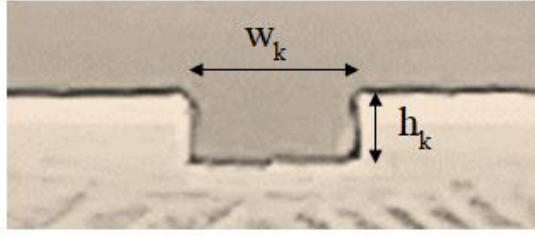


(b)

**Şekil 2.** a) Mikro freze (Kesici uç çapı (D1)  $670 \mu\text{m}$ , sap çapı (D2) 4 mm, kanal boyu (L1) 1,4 mm, konik boy (L2) 8,5 mm, freze boyu (L) 50 mm, helis açısı (H)  $30^\circ$ , talaş açısı  $8^\circ$ , kesici ağız yarıçapı  $5 \mu\text{m}$ , sertlik 55 HRC).  
b) İşparçası, bağlama fikstürü



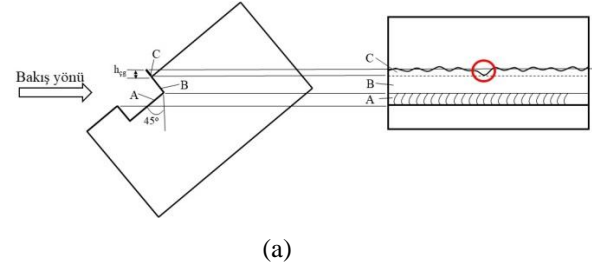
**Şekil 3.** Mikro-frezelenmiş bir numune



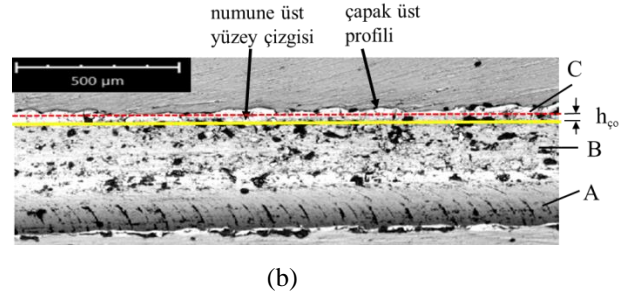
Şekil 4. Mikro frezenin numunelere giriş bölgesinden örnek görüntü (4 no'lu kanal,  $w_k=679 \mu\text{m}$ ,  $h_k=318 \mu\text{m}$ )

Tablo 1. Al6061 T651 malzeme özellikleri [35, 36]

Özellik	Değer
Yoğunluk ( $\text{g/cm}^3$ )	2,7
Akma mukavemeti (MPa)	276
Çekme mukavemeti (MPa)	310
Elastik modül (GPa)	58,9
Ergime sıcaklığı ( $^{\circ}\text{C}$ )	610
Sertlik (HRC)	90
Isıl iletkenlik ( $\text{W/m.K}$ )	167



(a)



(b)

Şekil 5. a) Kanal (kesit) ve çapak görüntülerindeki terimler; A: işlenmiş kanalın tabanı, B: kanal yan duvarı, C: üst çapak, b) çapak terminolojisi ve üst çapak ortalama yüksekliği ( $h_{\text{ço}}$ ).

Tablo 2. Deneysel tasarım

Kanal no	f (mm/dak)	$f_z$ (*) ( $\mu\text{m}$ )	$h_k$ ( $\mu\text{m}$ )	RD ( $\mu\text{m}$ )	$w_{ko}$ , ( $w_{kmin}-w_{kmax}$ ) ( $\mu\text{m}$ )	$h_{ko}$ , ( $h_{kmin}-h_{kmax}$ ) ( $\mu\text{m}$ )	$h_{\text{ço}}$ , ( $h_{\text{çmin}}-h_{\text{çmak}}$ ) ( $\mu\text{m}$ )
1	25	3,13	200	-	675, (674-678)	220, (214-222)	24,2, (23,8-24,7)
2	40	5	200	-	676, (673-677)	219, (218-223)	30,5, (30,1-31,3)
3	55	6,88	200	-	683, (682-685)	220, (216-228)	41,4, (39,2-42,4)
4	25	3,13	300	-	680, (678-681)	320, (317-324)	26,1, (25,8-28,6)
5	40	5	300	-	679, (678-684)	324, (322-329)	33,1, (30,3-35,7)
6	55	6,88	300	-	671, (668-674)	328, (320-330)	47,7, (47,3-50,1)
7	25	3,13	300	10	702, (700-708)	320, (311-324)	14,3, (13,7-14,7)
8	40	5	300	10	702, (698-704)	326, (319-332)	22,8, (20,9-24,1)
9	55	6,88	300	10	707, (705-709)	324, (318-330)	27,1, (25,1-28,1)
10	25	3,13	300	15	711, (708-712)	334, (322-338)	5, (4,5-5,6)
11	40	5	300	15	710, (706-712)	319, (317-322)	8, (7,3-8,9)
12	55	6,88	300	15	712, (705-718)	322, (318-324)	9,2, (7,8-10)
13	25	3,13	300	20	720, (708-724)	332, (322-338)	4,2, (3,5-4,6)
14	40	5	300	20	716, (710-719)	321, (317-322)	6,3, (5,3-6,9)
15	55	6,88	300	20	716, (711-719)	320, (318-324)	8,0, (7,1-9)

(\*) Sunulan  $f_z$  değerleri f değerinin takım dönüş hızı ( $n=4000 \text{ dev/dak}$ ) ve kesici ağız sayısına (2) bölünmesinden elde edilmiştir.

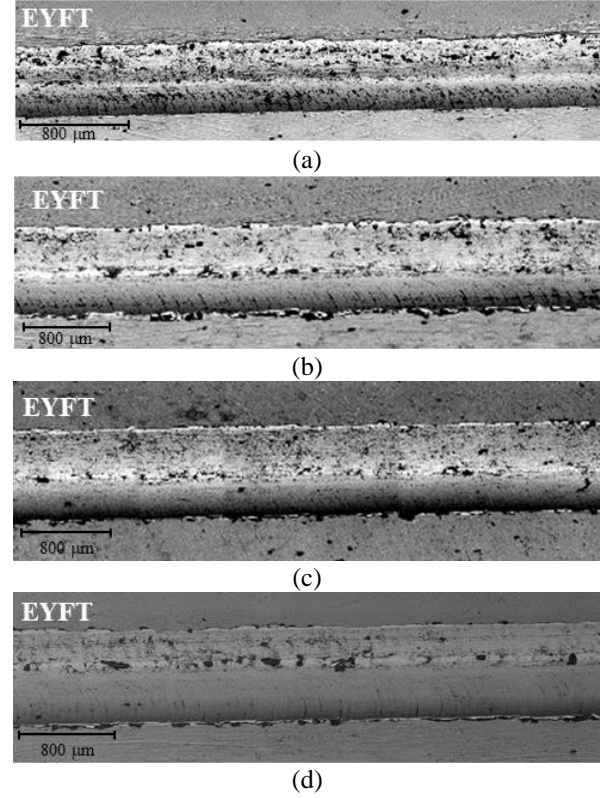
### III. BULGULAR ve TARTIŞMA

Bu çalışmada 670  $\mu\text{m}$  çaplı mikro freze ile değişik işleme koşullarında yapılan kanal frezeleme işlemlerinde (1-6 nolu kanallar) elde edilen  $w_{ko}$  değerleri 671-683  $\mu\text{m}$  arasındadır (Tablo 2). Bu değerler kullanılan mikro frezelerde radyal salgı ve takım çapında belirgin değişkenlik [2, 3] olmadığını göstermektedir. Ölçümlerin alındığı toplam 18 adet kanalda  $w_{kmin}$  ve  $w_{kmax}$  değerlerinin 668 ve 684  $\mu\text{m}$  aralığında olması deneylerin güvenilirliğinin ve tekrarlanabilirliğinin yüksek olduğunu göstermektedir. 1-3 nolu deneylerde  $h_k$  değeri 200  $\mu\text{m}$  hedeflenmesine rağmen  $h_{kmin}$  değeri en düşük 214  $\mu\text{m}$ ,  $h_{kmax}$  değeri en yüksek 228  $\mu\text{m}$  olmuştur. Bu kanallar için  $h_{ko}$  değerleri ise 219-220  $\mu\text{m}$  aralığındadır. 4-6 nolu deneylerde  $h_k$  değeri 300  $\mu\text{m}$  hedeflenmesine rağmen  $h_{kmin}$  değeri en düşük 317  $\mu\text{m}$ ,  $h_{kmax}$  değeri en yüksek 330  $\mu\text{m}$  olmuştur. Çapak temizleme amaçlı yapılan 7-15 nolu deneylerde ise  $h_{kmin}$  değeri en düşük 311  $\mu\text{m}$ ,  $h_{kmax}$  değeri en yüksek 338  $\mu\text{m}$  olmuştur (Tablo 2). 45 adet deneyin tamamı gözönüne alındığında, ölçümler mikro frezenin numune üst yüzeyine dokundurularak z-ekseninin sıfırlanması sırasında yüzeyden 14-38  $\mu\text{m}$  malzeme kaldırıldığını (deneysel hata) göstermektedir. Kanal derinlikleri hedeflenen 300  $\mu\text{m}$  değerinden en fazla %12,6 sapmış olmasına rağmen, işleme derinliğinin üst çapak oluşumunda çok etkili bir parametre olmaması nedeniyle [23, 24]  $h_{co}$  değerlerindeki etkisi ihmal edilmiştir. Yapılan 45 deneyde  $h_{co}$  değerleri ile  $h_{cmin}$  arasındaki en büyük sapma %15,8 (14 nolu kanal),  $h_{cmax}$  arasındaki en büyük sapma %11,3 (11 nolu kanal) olmuştur. Diğer deneylerdeki sapmaların bu değerlerden daha az olduğu ve  $h_{co}$  değerlerinin tespitinde aynı koşullarda üç deney yapıldığı düşünüldüğünde her bir kanal için hesaplanan  $h_{co}$  değerlerinin güvenilirliği ve tekrarlanabilirliği oldukça iyidir.

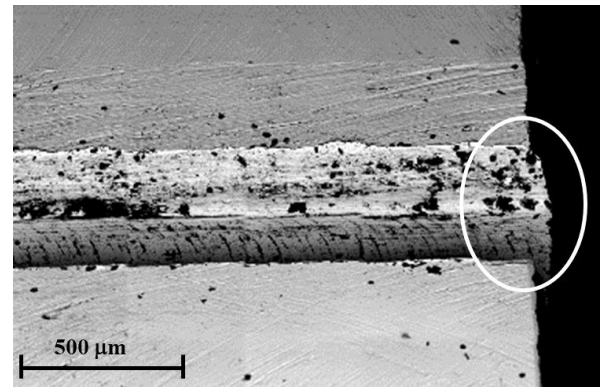
Ölçülen  $w_{ko}$ ,  $w_{kmin}$  ve  $w_{kmax}$  değerlerinin  $d_t$  değerine yakınlığı işleme sonunda takımın oluştuğu çapsal aşınmanın çok düşük (çapta %1'den daha az) olduğunu göstermiştir. Takımlardaki çapsal aşınmanın ve malzeme sıvanmasının az olmasının önemli sebepleri arasında banyo tipi kesme sıvısı kullanımı (etkili takım soğutma), Al6061 T651 malzemenin sertliğinin düşük olması, her numune için toplam işleme boyunun kısa olması (yaklaşık 1 m), işleme (kanal) derinliğinin ve takım dönüş hızının görece olarak düşük olması sayılabilir.

Örnek kanal görüntülerinden (Şekil 6), bu çalışmadaki işleme koşullarında üst çapak oluşumunun sürekli olduğu, bölgesel çapak kopmalarına rastlanmadığı,

yırtılma çapağının EYFT'nda ve ZYFT'nda oluşmadığı (işlenmiş duvar ile oluşan çapağın birbirleriyle bütünlük gösterdiği), oluşan üst çapaklarının Poisson tipi olduğu tespit edilmiştir. Kanalların bazılarının çıkış bölgesinde ise 100  $\mu\text{m}$ 'ye varan uzunluklarda sıvama çapağı oluşumu görülmektedir (Şekil 7). Yırtılma ve sıvama çapak oluşumlarına nadir rastlanması deneylerde banyo tipi kesme sıvısı uygulaması sayesinde.



Şekil 6. Kanalların eş-yönlü frezeleme duvarlarının ve üst çapaklarının 45° açılı görünüşü. Kanal no: a) 1, b) 7, c) 9, d) 10.

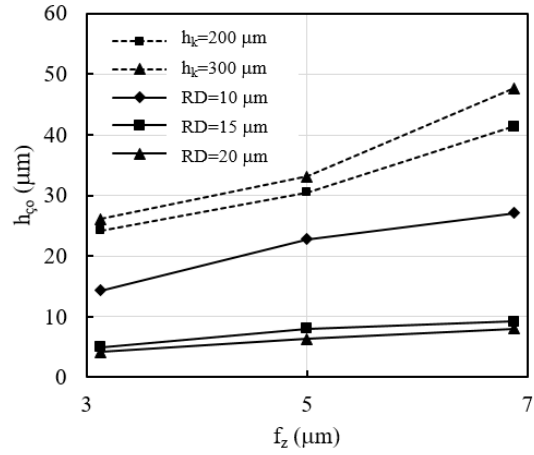


Şekil 7. 1 nolu kanalda mikro frezenin çıkış bölgesinde görülen sıvama çapağı.

1-6 nolu kanallarda  $h_{co}$  değerleri artan  $f_z$  ve  $h_k$  değerleri ile artmaktadır (Şekil 8).  $h_k=200$   $\mu\text{m}$  değerinde  $h_{co}$  değerleri 24-41  $\mu\text{m}$  aralığında iken,

$h_k=300 \mu\text{m}$  değerinde  $26-48 \mu\text{m}$  arasındadır.  $h_k=300 \mu\text{m}$ 'de kanal derinliği  $h_k=200 \mu\text{m}$ 'ye göre %50 artırılmış olmasına rağmen değişen  $f_z$  değerleri için  $h_{\text{ço}}$  en fazla %15 (%8,3-15,1 aralığında) artmıştır. Bu deneysel bulgu, işleme derinliğindeki artışın  $h_{\text{ço}}$  değerini doğru orantılı olarak artırmadığını ve işleme derinliğinin  $h_{\text{ço}}$  değerinin değişiminde önemli bir parametre olmadığını göstermektedir. Buna karşın  $f_z$  değerinin  $3,13 \mu\text{m}$ 'den  $6,88 \mu\text{m}$ 'ye artırılması (%119 artış)  $h_{\text{ço}}$  değerini  $h_k=200 \mu\text{m}$  için %69,7,  $h_k=300 \mu\text{m}$  için %82,7 artırmaktadır (Şekil 8).  $h_k$  ve  $f_z$  değerlerinin artışının  $h_{\text{ço}}$ 'ya etkisi orantılı olarak karşılaştırıldığında  $f_z$  değerinin  $h_{\text{ço}}$  değerinin değişiminde çok daha önemli bir parametre olduğu açıktır.  $f_z$  değerinin  $h_{\text{ço}}$ 'nun değişiminin en önemli parametrelerden bir olduğu literatürde de bahsedilmektedir [18, 20, 23, 24].

Üst çapağın temizlenmesi için EYFT'na (duvara) uygulanan  $RD=10 \mu\text{m}$  değerindeki ZYF, üst çapağın  $h_{\text{ço}}$  değerini  $f_z=3,13, 5$  ve  $6,88 \mu\text{m}$  değerleri için sırasıyla %45, %31 ve %43 azaltmıştır (Şekil 8). Bu değerler  $RD=15 \mu\text{m}$  için sırasıyla %81, %75 ve %81,  $RD=20 \mu\text{m}$  için %84, %81 ve %83 olmuştur. Sonuç olarak, bu çalışmada kullanılan işleme parametreleri için en düşük çapak yüksekliği  $RD=20 \mu\text{m}$ 'de elde edilmiş,  $RD=15 \mu\text{m}$  ( $d_t$ 'nin yaklaşık %2'si) değerinde  $RD=20 \mu\text{m}$ 'ye çok yakın çapak yüksekliği elde edilmiş, buna karşın  $RD=10 \mu\text{m}$  değerinde çapak yüksekliği daha az azalmıştır. Elde edilen deneysel verilere göre, [18] nolu referansta üst çapağın temizlemek için önerilen  $RD=10 \mu\text{m}$  değeri her ne kadar bu çalışmada elde edilen  $RD$  değerine yakın gibi gözükse de, referansta kullanılan mikro freze çapı ( $100 \mu\text{m}$ ), işleme genişliği ( $70 \mu\text{m}$ ) ve işleme derinliği ( $1-11 \mu\text{m}$  aralığında) bu çalışmaya göre çok küçüktür. Bu nedenle, referanstaki ve bu çalışmadaki sonuçlar doğrudan karşılaştırılmasa da, bu çalışmada daha ağır koşullu bir MF işleminde (büyük  $d_t$ ,  $h_k$  ve  $w_k$ ) oluşan üst çapağın temizlenmesinde referansta kullanılan  $RD$  değerine yakın bir değerde ( $15 \mu\text{m}$ ) dikkate değer başarı sağlanmış olması literatüre önemli bir katkıdır.



Şekil 8.  $h_{\text{ço}}$  değerlerinin  $f_z$ ,  $h_k$  ve  $RD$  ile değişimi

#### IV. SONUÇLAR

Bu çalışmada değişik işleme koşullarında  $670 \mu\text{m}$  çaplı mikro freze ile işlenen Al6061 T651 malzemede eş-yönlü frezeleme tarafı (EYFT) kanal duvarlarının üstlerinde oluşan üst çapağının karakteristikleri ve MF ile temizlenmesi ile ilgili elde edilen sonuçlar aşağıda sunulmuştur:

- Kanal boyut ölçümlerinin takım çapı ve kanal derinlik ortalaması ( $h_{ko}$ ) ile tutarlılığı kullanılan takımlarda radyal salgı, belirgin çap değişkenliği ve kesici ağız bozukluğu olmadığını göstermiştir. Aynı işleme koşullarında tekrarlanan deneylerden elde edilen üst çapak yükseklik ortalaması ( $h_{\text{ço}}$ ) değerlerinin tutarlılığı gerçekleştirilen deneylerin güvenilirliğinin ve tekrarlanabilirliğinin yüksek olduğunu göstermiştir.  $h_{\text{ço}}$  değerlerinin tespitinde üst çapak profilinin büyük bir kısmının kanal boyunca sayısallaştırılması sayesinde literatürdeki diğer çalışmalara göre çok daha doğru sonuçlar elde edilmiştir.
- İşlenen kanallarda EYFT'ndaki  $h_{\text{ço}}$  değerleri zıt-yönlü frezeleme tarafı (ZYFT) değerlerinden belirgin olarak yüksektir. EYFT'ndaki çapaklar sürekliliği olup Poisson tipidir. Deneylerde banyo tipi kesme sıvısı kullanımı yırtılma ve sıvama çapak oluşumunu önemli ölçüde engellemiştir.
- İşleme (kanal) derinliğinin ( $h_k$ ) artışı  $h_{\text{ço}}$  artışında çok etkili olmamasına karşın, diş başı ilerleme ( $f_z$ ) değerindeki artış  $h_{\text{ço}}$  değerini önemli ölçüde artırmıştır.
- EYFT'ndaki üst çapağın temizlenmesi amacıyla yapılan zıt-yönlü frezeleme işlemlerinde kullanılan  $RD$  değerlerinin ( $10, 15$  ve  $20 \mu\text{m}$ ) artışı ile bu çalışmada kullanılan iki  $f_z$  değerinde de çapak yüksekliği azalmıştır.

RD=15  $\mu\text{m}$  değerinde (takım çapının yaklaşık %2'si)  $h_{\text{ço}}$  değerleri çok belirgin olarak (%80-84 aralığında) azaltmıştır. Daha yüksek RD değeri (20  $\mu\text{m}$ ) kullanımı  $h_{\text{ço}}$  değerini azaltmada çok belirgin bir fayda sağlamamıştır.

## KAYNAKLAR

- [1] Geier, N., Szalay, T., & Takács M., (2019). Analysis of thrust force and characteristics of uncut fibres at non-conventional oriented drilling of unidirectional carbon fiber-reinforced plastic (UD-CFRP) composite laminates. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 100, 3139–3154.
- [2] de Oliveira, F.B., Rodrigues, A.R., Coelho, R.T., & de Souza, A.F., (2015). Size effect and minimum chip thickness in micro milling. *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 89, 39–54.
- [3] Ni, C., Chen, M., Wu, C., Pei, X., Qian, J., & Reynaerts, D., (2017). Research in minimum undeformed chip thickness and size effect in micro end-milling of potassium dihydrogen phosphate crystal. *Int. J. Mech. Sci.*, 134, 387–398.
- [4] Jáuregui, J.C., Reséndiz, J.R., Thenozhi, S., Szalay, T., Jacso, A., & Takacs, M., (2018). Frequency and time-frequency analysis of cutting force and vibration signals for tool condition monitoring. *IEEE Access* PP (99), 1–1.
- [5] Singh, K.K., & Singh, R., (2018). Chatter stability prediction in highspeed micromilling of Ti6Al4V via finite element based micro end mill dynamics. *Adv. Manuf.*, 6, 95–106.
- [6] Wang, J.J., Uhlmann, E., Oberschmidt, D., Sung, F., & Perfilov, I., (2016). Critical depth of cut and asymptotic spindle speed for chatter in micro milling with process damping. *CIRP Ann. Manuf. Technol.*, 65, 113–116.
- [7] Aslantaş, K., Hopa, H.E., Perçin, M., Uçun, İ., & Çiçek, A., (2016). Cutting performance of nanocrystalline diamond (NCD) coating in micro-milling of Ti6Al4V alloy. *Precis. Eng.*, 45, 55–66.
- [8] Kiswanto, G., Zariatin, D.L., & Ko, T.J., (2014). The effect of spindle speed, feed-rate and machining time to the surface roughness and burr formation of aluminum alloy 1100 in micro-milling operation. *J. Manuf. Process.*, 16, 435–450.
- [9] Oliaei, S.N.B., & Karpas, Y., (2017). Built-up edge effects on process outputs of titanium alloy micro milling. *Precis. Eng.*, 49, 305–315.
- [10] Zhang, X., Yu, T., Wang, W., & Zhao, J., (2019). Improved analytical prediction of burr formation in micro end milling. *Int. J. Mech. Sci.*, 151, 461–470.
- [11] Aurich, J.C., Dornfeld, D., Arrazola, P.J., Franke, V., Leitz, L., & Min, S., (2009). Burrs—analysis, control and removal. *CIRP Ann. Manuf. Technol.*, 58, 519–542.
- [12] Lee, K., & Dornfeld, D.A., (2005). Micro-burr formation and minimization through process control. *Precis. Eng.*, 29, 246–252.
- [13] Hashimura, M., Hassamont, J., & Dornfeld, D.A., (1999). Effect of in-plane exit angle and rake angles on burr height and thickness in face milling operation. *J. Manuf. Sci. Eng.*, 121, 13–19.
- [14] Kumar, P., Bajpai, V., & Singh, R., (2016). Burr height prediction of Ti6Al4V in high speed micro-milling by mathematical modeling. *Manuf. Lett.*, 11, 12–16.
- [15] Zhang, T., Liu, Z., & Xu, C., (2013). Influence of size effect on burr formation in micro cutting. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 68, 1911–1917.
- [16] Kumar, P., Kumar, M., Bajpai, V., & Singh, N.K., (2017). Recent advances in characterization, modeling and control of burr formation in micro-milling. *Manuf. Lett.*, 13, 1–5.
- [17] Saptaji, K., & Subbiah, S., (2017). Burr reduction of micro-milled microfluidic channels mould using a tapered tool. *Procedia Eng.*, 184, 137–144.
- [18] Wu, X., Li, L., & He, N., (2017). Investigation on the burr formation mechanism in micro cutting. *Precis. Eng.*, 47, 191–196.
- [19] Mian, A.J., Driver, N., & Mativenga, P.T., (2011). Identification of factors that dominate size effect in micro-machining. *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 51, 383–394.
- [20] Balázs, B.Z., Szalay, T., & Takács, M., (2017). Investigation of micro milled surface characteristics. *Proc. Int. Conf. on Innovative Technologies*, 161–164
- [21] Biermann, D., & Steiner, M., (2012). Analysis of micro burr formation in austenitic stainless steel X5CrNi18-10. *Procedia CIRP*, 3, 97–102.
- [22] Hajiahmadi, S., (2019). Burr size investigation in micro milling of stainless steel 316 L. *Int. J. Lightweight Mater. Manuf.*, 2, 296–304.
- [23] Aramcharoen, A., & Mativenga, P.T., (2009). Size effect and tool geometry in micromilling of tool steel. *Precis. Eng.*, 33, 402–407.
- [24] Piquard, R., D'Acunto, A., Laheurte, P., & Dudzinski, D., (2014). Microend milling of NiTi biomedical alloys, burr formation and phase transformation. *Precis. Eng.*, 38, 356–364.
- [25] Chen, M.J., Ni, H.B., Wang, Z.J., & Jiang, Y., (2012). Research on the modeling of burr formation process in micro-ball end milling operation on Ti-6Al-4V. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 62, 901–912.
- [26] Gilbin, A., Fontaine, M., Michel, G., Thibaud, S., & Picard, P., (2013). Capability of tungsten carbide micro-mills to machine hardened tool steel. *Int. J. Precis. Eng. Manuf.*, 14, 23–28.
- [27] Aramcharoen, A., Mativenga, P., Yang, S., Cooke, K., & Teer, D., (2008). Evaluation and selection of hard coatings for micro milling of



- hardened tool steel. *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 48, 1578–1584.
- [28] Swain, N., Venkatesh, V., Kumar, P., Srinivas, G., Ravishankar, S., & Barshillia, H., (2017). An experimental investigation on the machining characteristics of Nimonic 75 using uncoated and TiAlN coated tungsten carbide micro-end mills. *CIRP J. Manuf. Sci. Technol.*, 16, 34–42.
- [29] Kou, Z., Wan, Y., Cai, Y., Liang, X., & Liu, Z., (2015). Burr controlling in micro milling with supporting material method. *Procedia Manuf.*, 1, 501–511.
- [30] Saptaji, K., Subbiah, S., & Dhupia, J.S., (2012). Effect of side edge angle and effective rake angle on top burrs in micro-milling. *Precis. Eng.*, 36, 444–450.
- [31] Kuram, E., (2017). Kesici Takım Bağlama Uzunluğunun Mikro Frezelemede Takım Aşınması, Kuvvetler ve Çapak Boyutu Üzerindeki Etkileri, Dokuz Eylül Üniversitesi-Müh. Fak. Fen ve Müh. Dergisi, 19, 229-237,
- [32] Milling Finish: Complete Guide (Tips, Techniques, and Secrets), <https://www.cnccookbook.com/milling-finish-complete-guide-feeds-speeds-master-class-lesson-7/> (Mart 2022).
- [33] How to Choose a Stepover for 3D Profiling, <https://www.cnccookbook.com/cnc-stepover/>, (Mart 2022).
- [34] Rasband, W.S., ImageJ. U.S. National Institutes of Health, Bethesda, Maryland, USA, 1997–2016. <http://imagej.nih.gov/ij>, (Haziran 2022).
- [35] MATWEB, Material Property Data, <http://www.matweb.com/index.aspx>, (Nisan 2022).
- [36] 6061 Aluminium, [https://en.wikipedia.org/wiki/6061\\_aluminium\\_alloy](https://en.wikipedia.org/wiki/6061_aluminium_alloy), (Mayıs 2022).