



Ti6Al4V Alaşımının Ultrasonik Yüksek Hızlı Mikro Frezelenmesinde Talaşların İncelenmesi

Aybars Mahmat^{1*}, Nihat Tosun², Salih Agar³

¹ Munzur Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Tunceli, Türkiye (ORCID: 0000-0001-9261-0620), aybarsmahmat@munzur.edu.tr

² Firat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Elazığ, Türkiye (ORCID: 0000-0002-6211-5044), ntosun@firat.edu.tr

³ Munzur Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Tunceli, Türkiye (ORCID: 0000-0003-1608-597X), salihagar@munzur.edu.tr

(İlk Geliş Tarihi 23 Ağustos 2022 ve Kabul Tarihi 25 Ocak 2023)

(DOI: 10.31590/ejosat.1165463)

ATIF/REFERENCE: Mahmat, A., Tosun, N. & Agar, S. (2023). Ti6Al4V Alaşımının Ultrasonik Yüksek Hızlı Mikro Frezelenmesinde Talaşların İncelenmesi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (46), 27-36.

Öz

Ti6Al4V alaşımının işlenebilirliği, ultrasonik ve geleneksel mikro frezeleme ile işlem parametreleri ve farklı soğutma/yağlama yöntemlerinin talaş kalınlık oranı ve talaş formuna etkileri bu çalışmada deneysel olarak araştırıldı. Bu araştırma yapılırken deneysel çalışmalarda 0.02 mm sabit talaş derinliği, 0.66 mm/s sabit ilerleme ve 20.000, 40.000 ve 60.000 dev/dak devir sayısı işleme şartlarında kuru işleme, nano Al₂O₃ partikül katkılı boraks-etilen glikol karışımı ve zeytinyağı- boraks-etilen glikol karışımı 50-100 mikro metre boyutlu Al₂O₃ içeren nano kesme sıvılı minimum miktarda yağlama (MMY) yöntemi, karbür ve TiSiN kaplamalı karbür kesici takımlar kullandı. Ultrasonik mikro frezelemede, sabit genlikte iki farklı titreşim frekansı (20 ve 30 kHz) kesici takıma uygulandı. Deneysel çalışmaların tümünde süreksiz talaş formu elde edildi. Talaş formuna soğutma yönteminin ve kesici takımının bir etkisi olmadığı belirlendi.

Anahtar Kelimeler: Ultrasonik işleme, Yüksek Hızlı Mikro frezeleme, Minimum Miktarla Yağlama (MMY) Yöntemi

Investigation of Chips in Ultrasonic High Speed Micro Milling of Ti6Al4V Alloy

Abstract

The machinability of Ti6Al4V alloy, the processing parameters with ultrasonic and conventional micro milling, and the effects of different cooling/lubrication methods on the chip thickness ratio and chip form were investigated experimentally in this study. While this research was being carried out, in experimental studies, dry machining under 0.02 mm constant depth of cut, 0.66 mm/s constant feed and 20,000, 40,000 and 60,000 rpm speed processing conditions, nano Al₂O₃ particle added borax-ethylene glycol mixture and olive oil-borax-ethylene glycol mixture The minimal amount of lubrication (MMY) method with nano-cutting fluid containing 50-100 micrometer size Al₂O₃ used carbide and TiSiN coated carbide cutting tools. In ultrasonic micro milling, two different vibration frequencies (20 and 30 kHz) of constant amplitude were applied to the cutting tool. Discontinuous chip form was obtained in all experimental studies. It was determined that the cooling method and the cutting tool had no effect on the chip form.

Keywords: Ultrasonic Machining, High Speed Micro Milling, Minimum Quantity Lubrication (MQL)

1. Giriş

10 µm'den daha küçük boyutlarda olan minyatür parçaların üretiminde kullanılan bir imalat yöntemi olan mikro mekanik işlemlerde çoğunlukla 100-999 µm çapında mikro parmak frezeler kullanılmaktadır. Mikro mekanik işlemlerde takım ömrünün az olmasının nedenlerinden biri şaft üzerindeki değişken streslerdir. Dinamik kuvvet değişimlerine önlem alınmaz ise kesici takım bir müddet sonra kırılacaktır. Mikro frezelemede, diş başına düşen ilerleme ve kesme derinliği kesici takım kenar yarıçapına oranı genellikle büyüktür. Bu durum, talaş kaldırma esnasında kararsızlıklara neden olmaktadır(Ucun, Aslantas ve Bedir 2013).

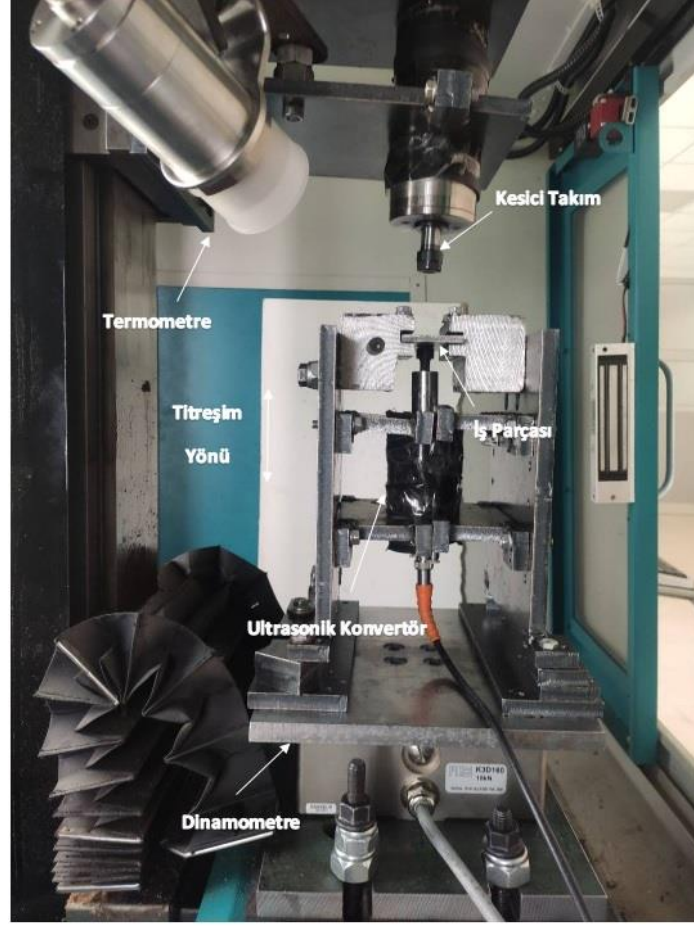
Ultrasonik işlemede yüksek frekanslı elektrik enerjisi bir dönüştürücü yardımıyla takıma ya da iş parçasına iletilen mekanik titreşime dönüştürülür (Behera 2011). Ultrasonik destekli işleme, genellikle yüksek frekansta ve düşük genliklerde üretilen ultrasonik ses dalgalarının bir dönüştürücü aracılığıyla mekanik bir harekete dönüştürüldüğü veya doğrudan kesici takıma veya iş parçasına uygulandığı bir karma işleme sürecidir (Maurotto ve Wickramarachchi, 2016). Yüksek frekansta ve düşük genlik değerlerinde çalışan bu sistem, geleneksel işleme yöntemlerinde doğru bir şekilde uygulandığı takdirde işleme çıktılarında kayda değer gelişmeler elde etmek mümkündür. Ultrasonik işleme, genellikle geleneksel yöntemlerle işlenmesi zor olan çok sert ve kırılğan malzemelerin (örn. Cam, elmas, seramik, karbür vb.) işlenmesinde uygulanır. Ultrasonik frezeleme, kesici takıma takılan ve üretim sürecinde büyük iz değişikliklerine katkıda bulunan bir titreşim alt montajına sahiptir. Bu yöntem, işlenmiş yüzeyde iyi yüzey pürüzlülüğü hassasiyeti sağlar (Brehl ve Dow 2008).

Talaşlı imalat işlemlerinde işleme performanslarının iyileştirilmesi amacıyla kesme sıvılarının geliştirilmesi gerekmektedir. Bu amaçla kesme sıvıları iyi bir soğutucu olmanın yanı sıra iyi yağlama özelliklerine sahip olmalıdır. Ayrıca plastik deformasyon esnasında kesici takım ile iş parçası arasındaki sürtünmeyi azaltması gerekmektedir. Kesme sıvısı kullanımını azaltmanın bir çözümü olarak Minimum Miktarda Yağlama (MMY, MQL=Minimum Quantity Lubrication) yöntemi kullanılmakta ve geliştirilmektedir. MMY yöntemi vasıtasıyla kesme sıvısının kesme bölgesine iletilmesine yönelik yapılan deneylerde daha uzun takım ömrü, daha düşük kesme kuvveti ve sıcaklığı ve daha pürüzsüz yüzeyler elde edilmiştir (Khan vd., 2009). MMY tekniği az miktarda yağ veya kayganlaştırıcı kullanır. Bir sis veya aerosol oluşturmak için basınçlı hava ile karıştırılır ve bu partiküller yağlama sağlar ayrıca basınçlı hava işleme sırasında ısının düşürülmesine yardımcı olur (Astakhov, 2008). Ni ve Zhu (2020), yaptıkları çalışmada TC4 alaşımının ultrasonik işleme yöntemi ve minimum miktarda yağlama yöntemlerinin birlikte kullanılmasıyla yüzey pürüzlülüğü yaklaşık % 30-50 iyileştirdiği kesme kuvvetini yaklaşık % 10-40 iyileştirdiği gözlemlenmiştir.

Herhangi bir süreçten bir talaşın şekli ve boyutları, malzeme hakkında birçok bilgiyi ortaya çıkarabileceğinden, talaş oluşumunun analizi çok önemlidir. Talaşlı imalatta oluşan talaş biçimleri; tabakanın ayrılma şekli, malzemenin özelliğine ve tezgâh koşullarına bağlı olarak gerçekleşmektedir. Talaş kalınlığının artarak uzunluğunun azalması sonucunda oluşan deformasyon derecesi talaş kalınlık oranıdır. Bu oran talaşlı imalattaki performans karakteristikleri (kesme sıcaklığı, kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü) üzerinde büyük rol oynamaktadır(Jin vd., 2020).

2. Materyal ve Metot

Çalışmada, sabit talaş derinliği ve ilerlemede farklı kesme hızları, soğutma yöntemi ve kesici takım türünün oluşturmuş olduğu talaş formasyonları incelendi. Çalışmada iş parçası olarak havacılık, nükleer, kimya, sağlık gibi endüstri alanlarında kullanılan yüksek mekanik özelliklere sahip Ti6Al4V alaşımı (%90Ti, %5,86Al, %4,08V ve %0,6Zn-S) ticari alınarak kullanıldı. Ti6Al4V alaşımı 955 MPa çekme gerilmesine, 878 MPa akma gerilmesine, % 13,5 uzamaya, 450 HV sertlik ve 1660°C ergime sıcaklığına sahiptir. Çalışmada, ticari amaçla kullanılan, 1mm çapında, 2 kesici ağızlı TiSiN kaplı ve kaplamasız karbür mikro takımlar kullanıldı. Yüksek hızlı işleme için 1 kW güç ve 60000 rpm devir sayısına sahip JETCO JMD-3 marka frezede su soğutmalı spindle motor CNC freze tezgâhına montajı yapıldı. Ultrasonik sistemde kullanılan titreşim dönüştürücülerin, iş parçasının sabitlendiği numune tutucu ve kesici takımın bağlandığı spindle motorun bağlandığı parçalardan oluşan deney düzeneği Şekil 1'de görülmektedir.



Şekil 1. Deney Düzenegi (Figure 1. Experimental Setup)

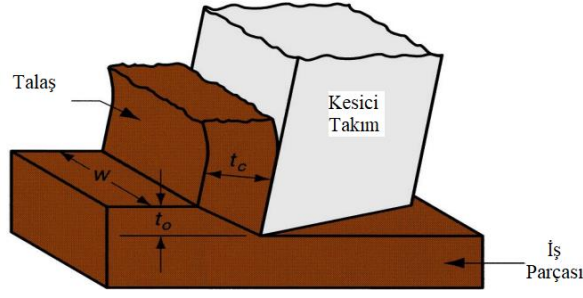
Bu çalışmada soğutma sistemi olarak kuru işleme ve iki farklı MQL yöntemi kullanıldı. Birinci MQL yönteminde soğutucu akışkan olarak nano Al₂O₃ partikül-boraks-etilen glikol karışımı kullanıldı. İkinci MQL yönteminde ise soğutucu akışkan olarak zeytinyağı-boraks-etilen glikol karışımı kullanıldı. Kesme sıvısı hazırlama işlemlerinde birinci MQL yönteminde 1/20 oranında boraks-etilen glikol karışımı içerisine hacimce % 1 oranında nano boyutlu Al₂O₃ partikül eklendi. Karışımdaki Al₂O₃ nano partiküller 50-100 nm boyutlarındadır. İkinci MQL yönteminde ise, 1/20 oranında boraks-etilen glikol karışımı içerisine %1 oranında zeytinyağı karışımına eklendi. Karışım ultrasonik homojenizatörde çökelti olmayacak şekilde hazırlandı. MQL yönteminde soğutma sıvısını kesme bölgesine püskürtmek amacıyla 4-6 bar çalışma aralığına sahip Werte/STN40 marka MQL ünitesi kullanıldı. Ultrasonik mikro frezeleme deneylerinde, iş parçasına radyal doğrultuda titreşim uygulamak için 20 ve 30 kHz'lik iki tip dönüştürücü elaman kullanıldı. Tablo 1'de tüm süreç parametreleri görülmektedir.

Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen talaşlar çok küçük boyutta olması nedeniyle çıplak gözle incelenmesi ve değerlendirmesi mümkün olmamıştır. Bu nedenle taramalı elektron mikroskobu (SEM) yardımıyla deneyler sonucunda elde edilen talaşların formasyonları incelendi ve talaş kalınlıkları ölçüldü. Talaş kalınlık oranı (r) Denklem 1' de görüldüğü gibi sabit talaş derinliğinin deney sonucunda elde edilen talaşların kalınlık değerine bölünmesi sonucunda elde edilir (Şekil 2).

$$r = t_o / t_c$$

(1)

Burada: t_o sabit talaş derinliğini, t_c deneyler sonunda ölçülen talaş kalınlıklarını ifade etmektedir.



Şekil 2. Talaş kalınlık oranının belirlenmesi (Figure 2. Determination of chip thickness ratio)

Tablo 1. Deneylerde kullanılan süreç parametreleri (Table 1. Process parameters used in experiments)

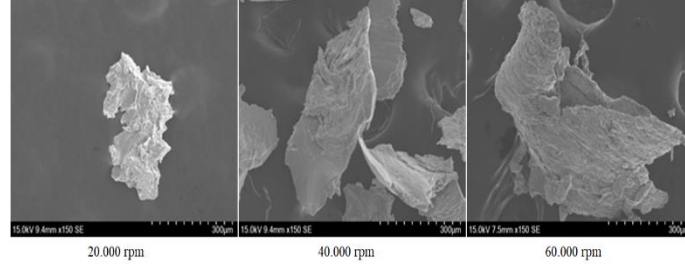
İşlem Parametreleri	Değerleri
Devir sayısı (rpm)	20000, 40000, 60000
İşleme yöntemi	Geleneksel, Ultrasonik
Soğutma yöntemi	Kuru, MQL
Soğutma sıvısı	MMY-1: Nano partikül Al_2O_3 - boraks-etilen glikol karışımı, MMY-2: Zeytinyağı- boraks-etilen glikol karışımı
Titreşim frekansı (kHz)	20, 30
Kesici takım	Kaplamasız karbür, TiSiN kaplamalı karbür
İlerleme (mm/s)	0.66
Kesme derinliği (mm)	0.02
Takım çapı (mm)	1

3. Araştırma Sonuçları ve Tartışma

3.1. Talaş Formasyonunun İncelenmesi

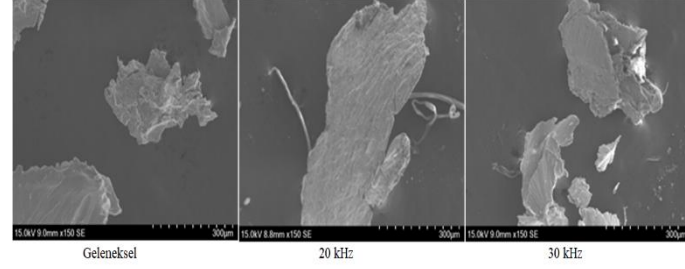
Sabit talaş derinliği ve ilerlemede farklı kesme hızları, soğutma yöntemi ve kesici takım türünün oluşturmuş olduğu talaş formasyonları incelendi. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen talaşlar çok küçük boyutta olması nedeniyle çıplak gözle incelenmesi ve değerlendirmesi mümkün olmamıştır. Bu nedenle her bir deney sonucunda elde edilen talaşlar taramalı elektron mikroskobu (SEM) yardımıyla incelendi. Farklı devir sayılarında yapılan deneyler sonucunda oluşan talaşlar Şekil 3’de, geleneksel, 20 ve 30 kHz titreşim frekansı ile mikro frezeleme gibi farklı işleme yöntemlerinde oluşan talaşlar Şekil 4’de, kuru ve MMY gibi farklı soğutma yöntemleriyle mikro frezelemede oluşan talaşlar Şekil 5’de, hızında, TiSiN kaplamalı ve kaplamasız karbür gibi farklı kesici takımlarla mikro frezelemede oluşan talaş formları ise Şekil 6’da görülmektedir.

Şekil 3’de, kuru işleme yöntemi ve TiSiN kaplamalı karbür kesici takım ile geleneksel mikro frezelemede, farklı devir sayılarında yapılan deneyler sonucunda oluşan talaş formlarının mikro görüntüleri verilmiştir. Talaş biçimleri incelendiğinde tüm işleme şartları altında genel olarak tüm işleme koşullarında kesintili talaş oluşumu gözlenmiştir. Titanyum alaşımları yüksek mukavemet ve düşük termal iletkenliği nedeniyle işlenmesi zor malzemelerdir. Bu nedenle titanyum alaşımlarının işlenmesi sırasında oluşan termoplastik kararsızlık ve talaşın dış yüzeyinden çatlakların başlaması ve yayılması kesintili talaş oluşumuna sebep olmaktadır (Barry vd., 2001). Devir sayısı arttıkça talaş kalınlıkları arttığı Şekil 3’de görülmektedir.



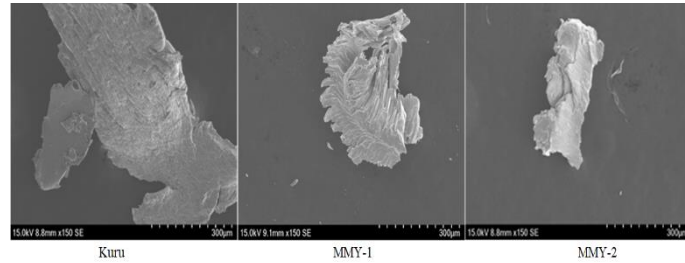
Şekil 3. Farklı kesme hızlarında oluşan talaşlar (TiSiN kaplamalı kesici takım, kuru işleme ve geleneksel mikro frezeleme) (Figure 3. Chips formed at different cutting speeds (TiSiN coated cutting tool, dry machining and conventional micro milling))

MMY-1 soğutma yöntemi, TiSiN kaplamalı kesici takım ve 40.000 dev/dak devir sayısı ile geleneksel, 20 ve 30 kHz titreşim frekansı uygulanarak yapılan ultrasonik mikro frezelemede oluşan talaş formlarının mikro görüntüleri Şekil 4'de verilmiştir. 40.000 dev/dak devir sayısında tüm işleme şartlarında talaş formları incelendiğinde süreksiz talaş oluştu. Süreksiz talaş oluşmasının nedeni talaşın dış yüzeyindeki çatlakların büyümesi ve yüzey üzerinde termal yumuşamanın baskınlığından kaynaklanan sınırlandırılmış kayma deformasyonunun neden olduğu adyabatik kesme bandı oluşmasındandır (Vyas ve Shaw 1999). Ultrasonik mikro frezelemede oluşan talaş uzunluklarının geleneksel mikro frezelemeye göre düşük olmasının sebebi titreşim sonucunda dinamik kuvvetlerin oluşmasıdır (Jung vd., . 2020). Ayrıca Şekil 4'deki mikro görüntülere göre en yüksek kesit değişimleri titreşimden dolayı ultrasonik mikro frezelemede meydana geldi.



Şekil 4. Farklı frezeleme yöntemlerinde oluşan talaşlar (MMY-1 soğutma yöntemi, TiSiN kaplamalı kesici takım ve 40.000 dev/dak devir sayısı) (Figure 4. Chips formed in different milling methods (MMY-1 cooling method, TiSiN coated cutting tool and 40,000 rpm speed))

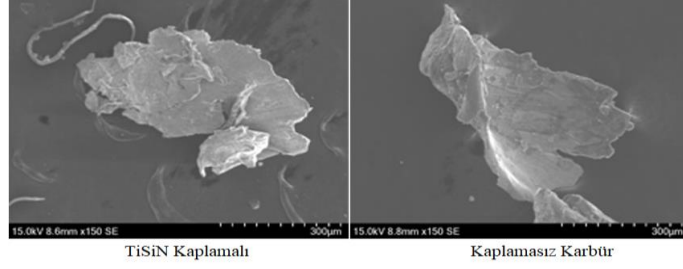
20 kHz titreşim frekansı ile ultrasonik mikro frezeleme, kaplamasız karbür kesici takım ve 40.000 dev/dak devir sayısında, kuru ve MMY gibi farklı soğutma yöntemleri ile yapılan frezelemede oluşan talaş formları Şekil 5'de verilmiştir. 40.000 dev/dak devir sayısında tüm işleme şartlarında talaş formları incelendiğinde kesintili talaş oluşmuştur. MMY soğutma yöntemiyle kesme bölgesindeki yağlanmayı artırarak, sürtünme ve sıcaklık oluşumunu azaltması ve yapışmayı engellemesinden dolayı elde edilen talaş boyutları kuru işleme göre daha düşüktür (Okafor ve Nwoguh 2020).



Şekil 5. Farklı soğutma yöntemlerinde oluşan talaşlar (20 kHz frekanslı ultrasonik mikro frezeleme, karbür kesici takım ve 40.000 dev/dak devir sayısı) (Figure 5. Chips formed in different cooling methods (20 kHz frequency ultrasonic micro milling, carbide cutting tool and 40,000 rpm speed))

30 kHz titreşim frekansı ile ultrasonik mikro frezeleme, MMY-1 soğutma yöntemi ve 40.000 dev/dak devir sayısında, TiSiN kaplamalı ve kaplamasız karbür kesici takımlar kullanılarak yapılan mikro frezelemede oluşan talaş formları Şekil 6'da verilmiştir. 40.000 dev/dak devir sayısında tüm işleme şartlarında talaş formları incelendiğinde kesintili talaş oluştu. Bunun nedeni titanyum

alaşımının yüksek mukavemet ve düşük termal iletkenliğe sahip olmasından dolayı kesici takım ve iş parçası arasında titreşimin meydana gelmesidir (Liu vd., 2005).

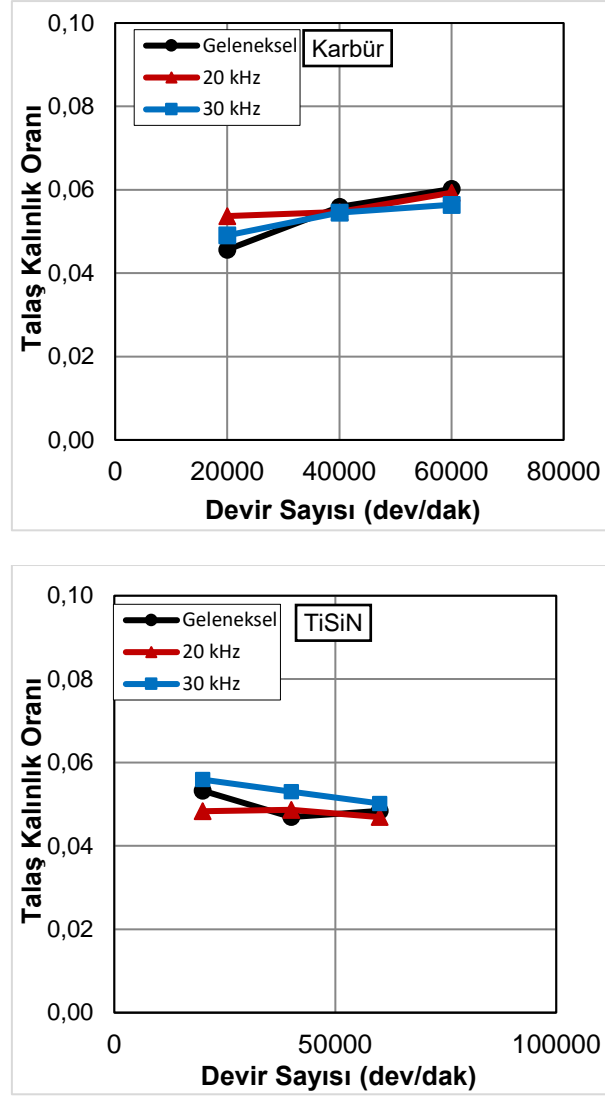


Şekil 6. Farklı kesici takım kullanımında oluşan talaşlar (30 kHz frekanslı ultrasonik mikro frezeleme, MMY-1 soğutma yöntemi ve 40.000 dev/dak devir sayısı) (Figure 6. Chips formed in the use of different cutting tools (30 kHz frequency ultrasonic micro milling, MMY-1 cooling method and 40,000 rpm speed))

3.2. Talaş Kalınlık Oranının İncelenmesi

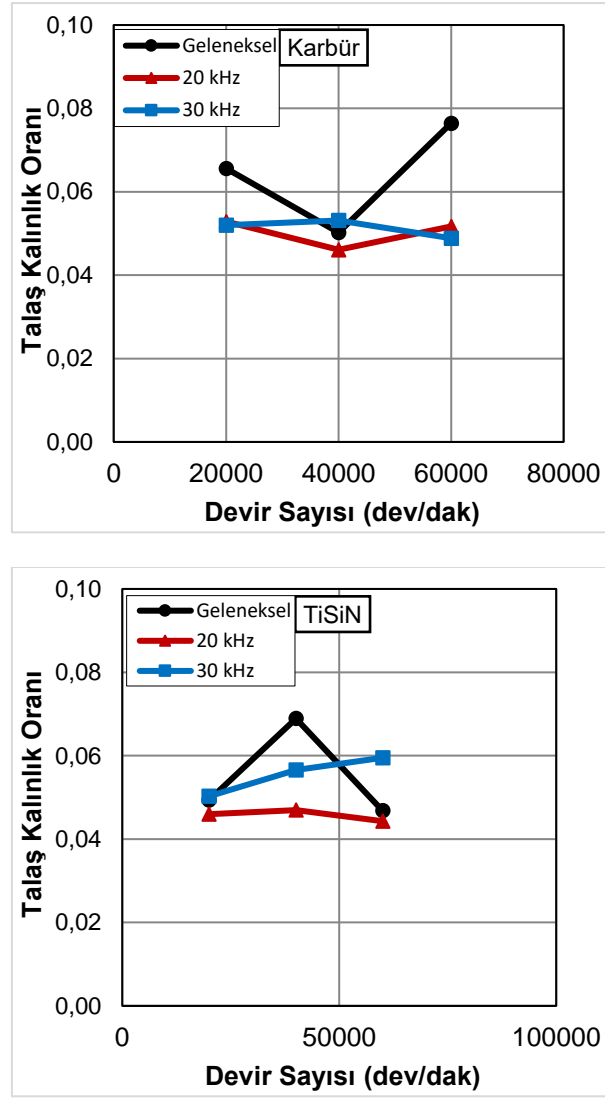
Talaş kalınlığının artarak uzunluğun azalması sonucunda oluşan deformasyon derecesi talaş kalınlık oranıdır. Bu oran talaşlı imalattaki performans karakteristikleri (kesme sıcaklığı, kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü) üzerinde büyük rol oynamaktadır (Jin vd., 2020). Deneyler sonucunda toplanan talaşlar optik mikroskopta görüntülenerek talaş kalınlıkları belirlendi. Deneysel çalışmalarda kullanılan sabit talaş derinliğinin deney sonucunda elde edilen talaşların kalınlık değerine bölünmesi sonucunda talaş kalınlık oranı (r) elde edildi. Kuru soğutma yöntemi kullanılarak geleneksel ve ultrasonik yüksek hızlı mikro frezelemede, devir sayısının talaş kalınlık oranı üzerindeki etkisi Şekil 7’de, nano Al₂O₃ partikül-boraks-etilen glikol karışımı ile minimum miktarda yağlama yöntemindeki (MMY-1) etkisi Şekil 8’de ve zeytinyağı-boraks-etilen glikol karışımı ile minimum miktarda yağlama yöntemindeki (MMY-2) etkisi Şekil 9’da görülmektedir.

Şekil 7’de görüldüğü gibi, kuru işleme yöntemi ve kaplamaşız karbür kesici takım kullanılarak yapılan mikro frezelemede, devir sayısı arttıkça elde edilen talaş kalınlık oranları da arttı. 40.000 ve 60.000 dev/dak devir sayısında üç işleme yönteminde birbirine yakın talaş kalınlık oranları elde edildi. TiSiN kaplamalı kesici takım ile yapılan deneylerde ise, devir sayısının artmasıyla talaş kalınlık oranının azaldığı görüldü. Artan devir sayısının talaş kalınlığını artırması nedeniyle talaş kalınlık oranı azalma eğilimi göstermektedir (Mamedov ve Lazoglu 2016). Ultrasonik mikro frezelemede artan titreşim frekansı birim zamanda uygulanan titreşim miktarının artırılmasıyla talaş kalınlığı arttı. Denklem 1’de görüldüğü gibi talaş kalınlığı arttıkça talaş kalınlık oranı azaldığı için talaş kalınlık oranı azaldı.



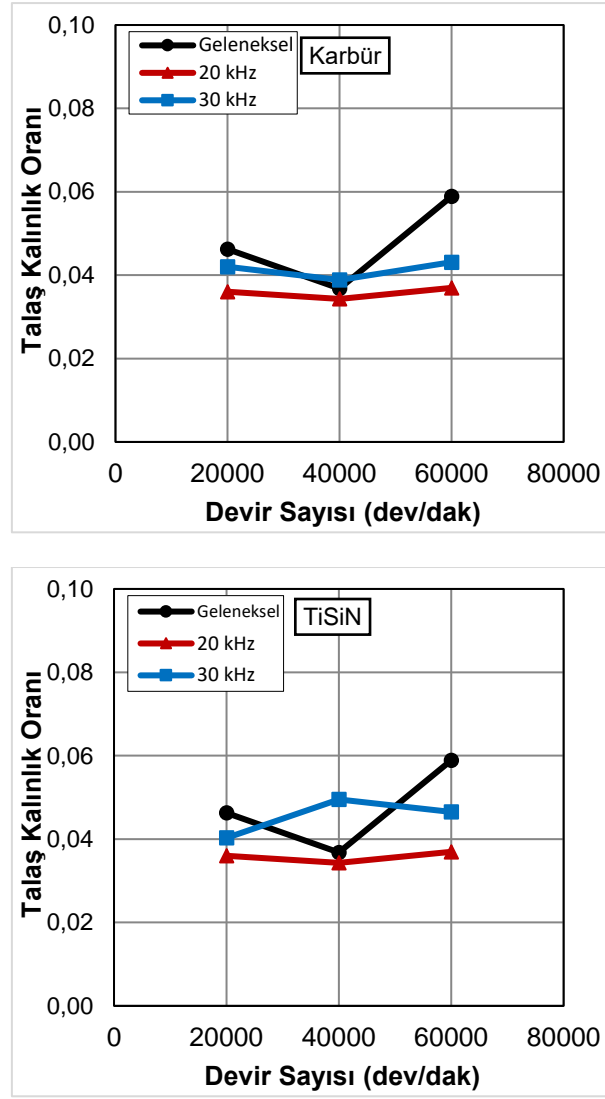
Şekil 7. Kuru soğutma yöntemi ile mikro frezelemede talaş kalınlık oranının değişimi (Figure 7. Change of chip thickness ratio in micro milling with dry cooling method)

Şekil 8'deki Al₂O₃ partikül-boraks-etilen glikol karşılıklı MMY yöntemi (MMY-1) ve kaplamasız karbür kesici takım kullanılarak yapılan mikro frezelemede, devir sayısının artması sonucunda geleneksel mikro frezelemede oluşan talaş kalınlık oranı önce azalır daha sonra artar. Fakat ultrasonik mikro frezelemede her iki frekansta meydana gelen talaş kalınlık oranı genel olarak azalma eğilimi gösterdi. TiSiN kaplamalı kesici takım kullanılarak yapılan deneylerde ise 20.000 ve 60.000 dev/dak devir sayılarında geleneksel ve 20 kHz işleme yöntemlerinde benzer sonuçlar elde edildi. Ancak 30 kHz frekanslı ultrasonik mikro frezelemede ve 40.000 dev/dak devir sayısındaki geleneksel mikro frezelemede talaş kalınlık oranlarının en yüksek olduğu Şekil 8'de görülmektedir.



Şekil 8. MMY-1 soğutma yöntemi ile mikro frezelemede talaş kalınlık oranının değişimi (Figure 8. Change of chip thickness ratio in micro milling with MQL-1 cooling method)

Şekil 9'daki zeytinyağı-boraks-etilen glikol karışımı soğutma sıvısı ile MMY yöntemi (MMY-2) ve kaplamasız karbür kesici takım kullanılarak yapılan mikro frezelemede, devir sayısının artması sonucunda geleneksel mikro frezelemede oluşan talaş kalınlık oranı önce azalır daha sonra artar. TiSiN kaplamalı kesici takım ile yapılan deneylerde ise, 20 kHz ultrasonik titreşimli işlemede talaş kalınlık oranında kayda değer bir değişiklik meydana gelmedi. Geleneksel ve 30 kHz'lik mikro frezeleme ile işlemede önce azalış ve daha sonra artış gösterdi.



Şekil 9. MMY-2 soğutma yöntemi ile mikro frezelemede talaş kalınlık oranının değişimi (Figure 9. Change of chip thickness ratio in micro milling with MQL-2 cooling method)

4. Sonuç

Geleneksel mikro frezelemede elde edilen talaş kalınlık oranı ultrasonik mikro frezelemeye göre daha yüksektir. TiSiN kaplamalı kesici takım ile yapılan deneylerde kaplamasız kesici takıma göre daha düşük talaş kalınlık oranı elde edildi. MMY yönteminin kuru işleme göre talaş kalınlık oranını arttırdığı görüldü. Deneysel çalışmaların tümünde süreksiz talaş formu elde edildi. Soğutma yönteminin ve kesici takım tiplerinin talaş formuna etkisinin bulunmadığı belirlendi. En düşük talaş kalınlık oranı, TiSiN kaplamalı kesici takım ve MMY-2 soğutma yöntemi kullanılarak, 40.000 dev/dak devir sayısında ve geleneksel mikro frezelemede elde edilirken, en yüksek talaş kalınlık oranı ise kaplamasız karbür kesici takım kullanılarak 60.000 dev/dak devir sayısında MMY-1 soğutma yöntemi kullanılarak yapılan 30 kHz frekans altında yapılan ultrasonik mikro frezelemede elde edildi

5. Teşekkür

Yapılan bu çalışma Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü (BAP) tarafından Proje Numarası: MF.20.35 ile desteklenmiştir. Çalışmanın yazarları Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü'ne desteklerinden ötürü teşekkür etmektedir.

Kaynakça

- Astakhov, V. P. 2008. Ecological machining: near-dry machining. In *Machining* (pp. 195-223). Springer, London.
- Barry, J., G. Byrne, and D. Lennon. 2001. "Observations on Chip Formation and Acoustic Emission in Machining Ti-6Al-4V Alloy." *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 41(7):1055-70. doi: 10.1016/S0890-6955(00)00096-1.
- Behara, Bikash Chandra. 2011. "Development and Experimental Study of Machining Parameters in Ultrasonic Vibration-Assisted Turning." National Institute of Technology.

- Brehl, D. E., and T. A. Dow. 2008. "Review of Vibration-Assisted Machining." *Precision Engineering* 32(3):153–72. doi: 10.1016/j.precisioneng.2007.08.003.
- Jin, Yuan, Yanshen Wang, Xiaocheng Zhang, and Bo Wang. 2020. "Micro-Milling of Fused Silica Based on Instantaneous Chip Thickness." *Journal of Materials Processing Technology* 285:116786. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2020.116786.
- Jung, Hongjin, Takehiro Hayasaka, Eiji Shamoto, and Liangji Xu. 2020. "Suppression of Forced Vibration Due to Chip Segmentation in Ultrasonic Elliptical Vibration Cutting of Titanium Alloy Ti–6Al–4V." *Precision Engineering* 64:98–107. doi: 10.1016/j.precisioneng.2020.03.017.
- Khan, M. M. A., M. A. H. Mithu, and N. R. Dhar. 2009. "Effects of Minimum Quantity Lubrication on Turning AISI 9310 Alloy Steel Using Vegetable Oil-Based Cutting Fluid." *Journal of Materials Processing Technology* 209(15–16):5573–83. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2009.05.014.
- Liu, Junyan, Rongdi Han, and Yongfeng Sun. 2005. "Research on Experiments and Action Mechanism with Water Vapor as Coolant and Lubricant in Green Cutting." *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 45(6):687–94. doi: 10.1016/j.ijmachtools.2004.09.022.
- Mamedov, Ali, and Ismail Lazoglu. 2016. "An Evaluation of Micro Milling Chip Thickness Models for the Process Mechanics." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 87(5–8):1843–49. doi: 10.1007/s00170-016-8584-6.
- Maurotto, A., Wickramarachchi, C. T. 2016. Experimental investigations on effects of frequency in ultrasonically-assisted end-milling of AISI 316L: a feasibility study. *Ultrasonics*, 65, 113-120.
- Ni, C., Zhu, L. 2020. Investigation on machining characteristics of TC4 alloy by simultaneous application of ultrasonic vibration assisted milling (UVAM) and economical-environmental MQL technology. *Journal of Materials Processing Technology*, 278, 116518.
- Okafor, Anthony Chukwujekwu, and Theodore Obumselu Nwoguh. 2020. "Comparative Evaluation of Soybean Oil–Based MQL Flow Rates and Emulsion Flood Cooling Strategy in High-Speed Face Milling of Inconel 718." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 107(9–10):3779–93. doi: 10.1007/s00170-020-05248-3.
- Ucun, İrfan, Kubilay Aslantas, and Fevzi Bedir. 2013. "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. doi: 10.1016/j.wear.2013.01.103.
- Vyas, A., and M. C. Shaw. 1999. "Mechanics of Saw-Tooth Chip Formation in Metal Cutting." *Journal of Manufacturing Science and Engineering* 121(2):163–72. doi: 10.1115/1.2831200.