

Kesici Takım Geometrisinin Ti-6Al-4V'nin İşlenmesi Sırasında Oluşan Tırtıklı Talaş Üzerindeki Etkisinin Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Araştırılması

An Investigation into the Effect of Cutting Tool Geometry on the Formation of Serrated Chips during Machining of Ti-6Al-4V: Finite Element Approach

Okan Deniz Yılmaz^{1*}, Samad Nadimi Babil Oliaei²

¹ Atılım Üniversitesi, İmalat Mühendisliği Bölümü, Ankara, okan.yilmaz@atilim.edu.tr

² Çankaya Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Ankara, samet.akar@cankaya.edu.tr

MAKALE BİLGİLERİ

Makale geçişi:

Geliş: 24 Mart 2020
Düzeltilme: 28 Nisan 2020
Kabul: 29 Nisan 2020

Anahtar kelimeler:

Talaşlı imalat, Sonlu Elemanlar yöntemi, tırtıklı talaş oluşumu, Ti-6Al-4V, Coulomb sürtünme katsayısı

ÖZET

Ti-6Al-4V titanyum alaşımının işlenmesi sırasında tırtıklı talaş (serrated chip) oluşumunun modellenmesi oldukça zordur ve takım ömrünü, işlenmiş parçanın doğruluğunu ve yüzey kalitesini etkilediği için hayati öneme sahiptir. Kesici uç geometrisinin tırtıklı talaş oluşumu üzerindeki etkisi daha ileri araştırmalar gerektirirken, termal yumuşama, deformasyon yumuşaması ve hasara dayanan modeller olmak üzere bu sorunu çözmek için çeşitli malzeme modelleri geliştirilmiştir. Bu çalışmada, teğet hiperbolik (TANH) fonksiyon kullanarak deformasyon yumuşama etkisini dikkate alan modifiye edilmiş bir Johnson-Cook temel malzeme modeli ele alınmıştır. Farklı geometrilere (talaş açısı, boşluk açısı ve kenar yarıçapı) sahip olan kesici takımların tırtıklı talaş oluşumu üzerinde etkileri modellenmiş ve analiz edilmiştir. Kesme kuvveti, talaş morfolojisi ve tırtıklı talaşın derecesi talaşlı imalat verisi olarak kullanılmıştır.

Doi: 10.24012/dumf.708814

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 24 March 2020
Revised: 28 April 2020
Accepted: 29 April 2020

Keywords:

Machining, finite element method, serrated chip formation, Ti-6Al-4V, Coulomb friction coefficient

ABSTRACT

Modeling of serrated chip formation during machining of Ti-6Al-4V titanium alloy is quite challenging and is of vital importance, since it affects tool life, machined part accuracy and surface quality. Several material constitutive models are developed to address this issue, including models based on thermal softening, strain softening and damage, while the effect of cutting tool geometry on serrated chip formation requires further investigations. In this study, a modified Johnson-Cook constitutive material model which takes into account strain softening effect in the form of tangent hyperbolic function has been considered. Cutting tools having different geometries (rake angle, clearance angle and edge radius) are considered and modeled and their effect on serrated chip formation is analyzed. Cutting force, chip morphology and degree of serration are used as machining process outputs.

* Sorumlu yazar / Correspondence
Okan Deniz YILMAZ
✉ okan.yilmaz@atilim.edu.tr

Giriş

Ti-6Al-4V biyomedikal, havacılık ve savunma sanayi dahil olmak üzere farklı endüstrilerde yaygın olarak kullanılan bir malzemedir [1, 2]. Ti-6Al-4V alaşımı, hem α stabilizatörleri (Ga, O, C, N, ve Al) hem de β stabilizatörleri (V, Mo, Mn, Cr, Ni, ve Fe) içeren ($\alpha + \beta$) titanyum alaşımıdır [1].

Ti-6Al-4V alaşımı, kesici takım malzemeleri ile yüksek kimyasal reaktivite gösterdiğinden kesici takıma yapışma eğilimindedir [3, 4]. Ayrıca, bu alaşımın düşük termal iletkenliği, kesici takımın ömrünü olumsuz etkileyen takım/iş parçası ara yüzünde sıcaklığın artmasına neden olur [5]. İlave olarak, bu alaşımın yüksek sıcaklıklarda sağlamlığını koruyabilmesi ve düşük Young modülüne sahip olması bu alaşımı kesilmesi daha zor bir malzeme haline getirir [6].

Bu alaşımın işlenmesi sırasındaki en önemli gözlem, talaşların periyodik testere diş biçiminde oluşmasıdır. Bu literatürde, parçalı talaş (segmented chip) [7], testere dişli talaş (saw-tooth chip) [8-11], katastrofik kesme tipi talaş (catastrophic shear-type chip) [12] ve kesme lokalize talaş (shear localized chip) [13] olarak ifade edilmiştir. Tırtıklı talaşların oluşumu, kesme kuvvetlerinde dalgalanmalara neden olur, takım aşınmasını hızlandırır ve işlenmiş yüzeyin kalitesini düşürür [14].

Araştırmalar, talaşların bölünme sıklığı ile kesme kuvvetlerinin dalgalanma sıklığı arasında bir uzlaşma olduğunu ortaya koymaktadır [15]. Bu nedenle, Ti-6Al-4V alaşımının işlenmesi sırasında tırtıklı talaş oluşum mekanizmasının anlaşılması son derece önemlidir. Tırtıklı talaş oluşumunu incelemek için yapılan deneysel yöntemler pahalı ve zaman alıcı olduğundan, sonlu elemanlar yöntemi bu olguyu incelemede etkin ve ucuz bir yöntem olarak kullanılabilir [16].

Sonlu elemanlar yöntemi, sıcaklık dağılımı, gerilme ve gerinim seviyeleri ve kesme lokalizasyonu gibi işleme yöntemi çıktıları hakkında bilgi edinmeyi mümkün kılar. ABAQUS / Explicit [4], DEFORM 2D [17] ve AdvantEdge [18] gibi düzlem gerinim (2D) modelleri kullanarak tırtıklı talaş oluşumunu

modellemek için çeşitli ticari sonlu eleman yazılımları kullanılabilir. Bu yazılımlar, metal kesme işlemlerinin simülasyonu için farklı algoritmalar kullanırlar. DEFORM 2D/3D ve ABAQUS/Standard programları kapalı (implicit) algoritmayı kullanırken, Third Wave AdvantEdge, ABAQUS/Explicit programları açık (explicit) algoritmayı kullanırlar.

Metal kesme işleminin doğru bir şekilde modellenmesi için sonlu eleman modeline doğru veriler girilmelidir; bunlar arasında, takım/talaş ve takım/iş parçası ara yüzlerindeki sürtünme ve temel malzeme modeli oldukça önemlidir. [16].

Ti-6Al-4V'nin işlenmesi sırasında tırtıklı talaş oluşumunu tahmin edebilmek için farklı temel malzeme modelleri geliştirilmekte ve kullanılmaktadır. Kesici takım geometrisinin tırtıklı talaş oluşumu üzerindeki etkisini araştıran çok az çalışma vardır. Bu çalışmada, üç farklı takım geometrisinin (talaş açısı (rake angle), boşluk açısı (clearance angle) ve kenar yarıçapı (edge radius)) tırtıklı talaş üzerindeki etkisi sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak analiz edilmiştir. Sonuçlar, farklı geometrilere sahip kesici takımların oluşturdukları tırtıklı talaşların bölünme derecesine göre karşılaştırılmıştır.

Sonlu eleman yönteminin modellenmesi

Bu çalışmada, SFTC DEFORM-2D yazılımı, Ti-6Al-4V'nin dikey (ortogonal) kesimini modellemek için kullanılmıştır. Kesici takım rijit, iş parçası elasto-plastik malzeme olarak modellenmiştir [16, 18, 19].

Kesici takıma sabit bir sınır şartı uygulanırken, iş parçası kesme hızına eşit bir hızla kesici takıma doğru hareket etmektedir. Kesici takımın dış yüzeylerine ortam sıcaklığına eşit bir sıcaklık uygulanır. Kesici takımın yan yüzü ve talaş yüzü için çevresiyle ısı değişimi yapabilir şekilde tanımlanmıştır. Ayrıca, çevresiyle ısı değişimi yapabilir durumu talaşın yüzeyine ilave olarak iş parçasının üst yüzeyi için de tanımlanmıştır. İş parçası aynı zamanda dikey yönde de sınırlandırılmıştır, böylece yalnızca yatay yönde hareket edebilir.

Yaich ve diğ. [20] sonlu eleman yöntemi kullanarak Ti-6Al-4V malzemenin dikey işlenmesinin birçok simülasyonu yapmışlardır ve adaptif örme tekniğinin (adaptive meshing

techniques) ve sürtünmenin Lagrangian formülü ile beraber kullanılmasının sonlu eleman yönteminin doğruluğu için önemli olduğunu belirtmiştir.

Bu çalışmada iş parçasının uzunluğu 3 ve genişliği 0.6 milimetre alınmıştır ve bu ölçüler bütün simülasyonlarda sabit tutulmuştur. İş parçası, DEFORM yazılımında bulunan maksimum eleman sayısı olan 10000 dörtkenar eleman (quadrilateral element) kullanılarak örülmüştür. Kesici takımın kenar yarıçapında daha sık eleman örebilmek için yeni örgü pencere (mesh window) tanımlanmıştır. Talaş kesme derinliği 20 dörtkenar eleman kullanılarak örülmüştür ve bu dörtkenar elemanların bir kenarı 5 µm uzunluğuna denk gelmektedir. Bu değer, Yaich ve diğ. [20] tarafından kullanılan 6 µm uzunluğuna yakındır ve simülasyon tahminlerinin doğru olduğunu göstermektedir.

Malzeme Modeli

Calamaz ve diğ. [18] tarafından geliştirilen modifiye edilmiş Johnson-Cook temel malzeme modeli bu çalışmada malzemenin termo-mekanik davranışını modellemek için kullanılmıştır. Birincil deformasyon bölgesine herhangi bir zarar vermeden oluşan adiyabatik kayma bandı, tırtıklı talaş oluşumunun ana nedeni olarak kabul edilir.

Tablo 1. Johnson-Cook malzeme modeli parametreleri [21]

Table 1. Johnson-Cook material model parameters [21]

| A | n | B | C | m |
|-------|-------|-------|--------|-------|
| [MPa] | [-] | [MPa] | [-] | [-] |
| 968 | 0.421 | 380 | 0.0197 | 0.577 |

Bu modelde, malzemenin akış stresi, sırasıyla üç ayrı gerinim, gerinim hızı ve sıcaklık fonksiyonunun çarpımı olarak ifade edilir. Gerinim yumuşama etkisi, aşağıdaki şekilde hiperbolik tanjant (TANH) fonksiyonu formunda tanımlanır:

$$\sigma = \left(A + B\varepsilon^n \left(\frac{1}{\exp(\varepsilon^a)} \right) \right) \left(1 + C \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \times \left(1 - \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right)^m \right) \left(D + (1 - D) \tanh \left(\frac{1}{(\varepsilon + S)^c} \right) \right) \quad (1)$$

ile

$$D = 1 - \left(\frac{T}{T_m} \right)^d \quad (2)$$

$$S = \left(\frac{T}{T_m} \right)^b \quad (3)$$

Burada, a, b, c ve d parametreleri malzeme modelinin kendi sabit değerleridir.

Tablo 2. Calamaz ve diğ. [18] malzeme modeli sabit parametreleri

Table 2. Calamaz et al. [18] material model constant parameters

| a | b | c | d | $\dot{\varepsilon}_0$ |
|-----|-----|-----|-----|-----------------------|
| [-] | [-] | [-] | [-] | [1/s] |
| 1.6 | 0.4 | 6 | 1.5 | 1 |

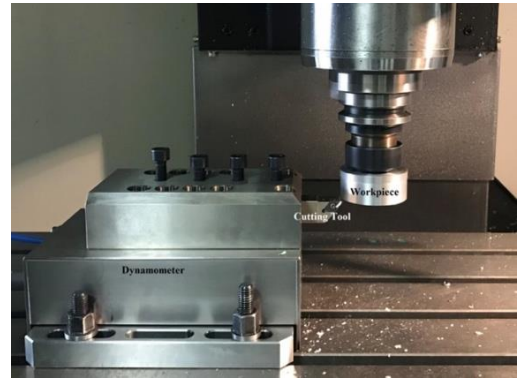
Sürtünme modeli

Takım/talaş ve takım/iş parçası ara yüzündeki sürtünme, metal kesme işlemi sırasında oluşan sıcaklığın, kuvvetin ve gerinin tahmin edilmesinde önemli bir etkiye sahiptir.

Geleneksel dikey talaşlı imalat işlemlerinde, sürtünme katsayısı, Coulomb modeli kullanılarak hesaplanabilir.

$$\mu = \frac{F_t + F_c \tan \alpha}{F_t - F_c \tan \alpha} \quad (4)$$

F_c gerçek kesme kuvveti, F_t gerçek itme kuvvetidir ve α kesici takımın talaş açısıdır (rake angle).



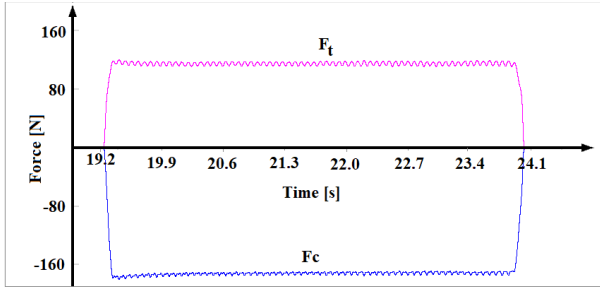
Şekil 1. Deney düzeneği

Figure 1. Experimental setup

Sürtünme katsayısını belirlemek için dikey kesme deneyleri yapılmıştır. Kesme ve itme kuvvetleri Kistler 9265B Dinamometre, Kistler Dynoware DAQ 5697 ve DynoWare yazılımı kullanılarak ölçülmüştür. Örnekleme

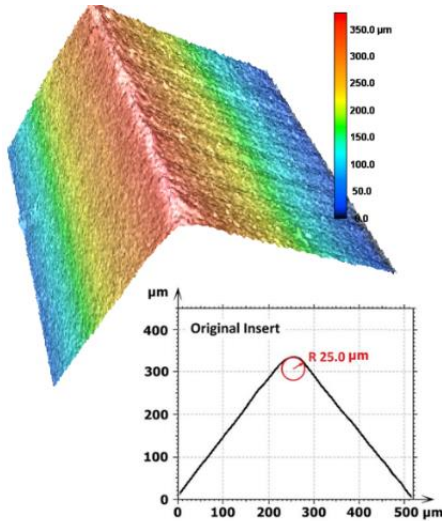
hızı (sampling rate) Dynoware yazılımında 10000 hertz alınmıştır. Ölçülen her kesme ve itme kuvveti için devir hızına (spindle speed) göre alçak geçirgen filtre (low pass filter) uygulanmıştır.

Şekil 1, deney düzeneğini ve Şekil 2, 60 m/dak kesme hızı ve 0.1 mm kesilmemiş talaş kalınlığı için ölçülen kesme kuvvetlerini göstermektedir.



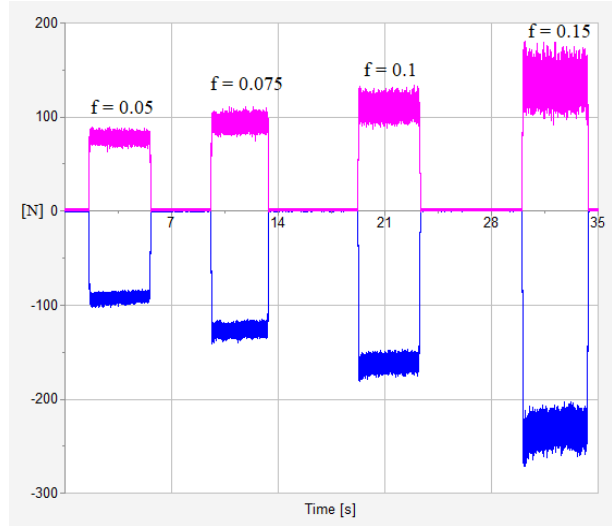
Şekil 2. Ölçülen kesme ve itme Kuvvetleri
Figure 2. Measured Cutting and Thrust Force

Kesici takımın (Sandvik DCMW 11 T3 04H13A) talaş açısı 0° , boşluk açısı 7° ve kenar yarıçapı $25 \mu\text{m}$ 3D lazer taramalı mikroskobu kullanılarak ölçülmüştür.



Şekil 3. Ölçülen kesici takım kenar yarıçapı
Figure 3. Measured edge radius of the tool

Şekil 3'de kenar yarıçapı ölçülen takımın mikroskop resimleri görülebilir. Şekil 2'de 60 m/min kesme hızında ve 0.1 mm kesilmemiş talaş kalınlığı seçilerek yapılan deneyin kesme kuvveti ortalama 161 Newton, itme kuvveti ortalama 109.9 Newton ölçülmüştür.

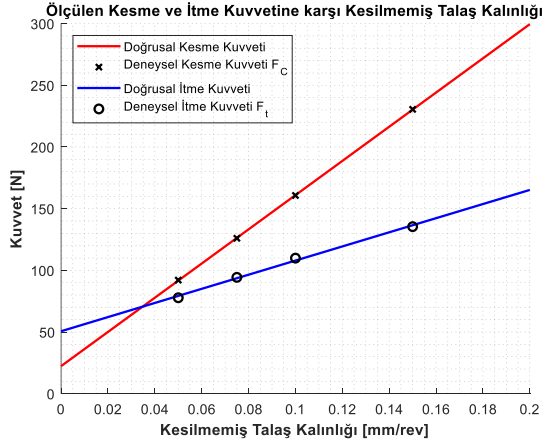


Şekil 4. Farklı kesilmemiş talaş kalınlığı için ölçülen kesme ve itme kuvvetleri ($V_c=60$ m/min)

Figure 4. Measured cutting and thrust forces for different uncut chip thicknesses ($V_c=60$ m/min)

Takımın kenar yarıçapı $25 \mu\text{m}$ olduğundan sürme (ploughing) kuvveti yüksek olacaktır. Bu yüzden, ölçülen kesme ve itme kuvvetlerinden sürme kuvveti çıkarılmalıdır [22]. Sürme kuvvetlerinin değerini hesaplayabilmek için sabit kesme hızında (60 m/min) kesilmemiş talaş kalınlığını değiştirerek deneyler yapılmalıdır. Kesilmemiş talaş kalınlığı 0.05, 0.075, 0.1 ve 0.15 alınarak 60 m/min'da dikey kesme deneyleri yapılmıştır. Şekil 4'de bu deneyde elde edilmiş kesme ve itme kuvvetleri görülebilir.

Sürme itme ve kesme kuvvetini, kesilmemiş talaş kalınlığını sıfıra doğrusal fonksiyon çizerek hesaplayabiliriz. Ölçülen kuvvetleri kesilmemiş talaş kalınlığına doğrusal olarak çizdiğimizde hesaplanan sürme kuvvetleri kesme için 22.39 ve itme için 50.65 Newton'dur. Doğrusal fonksiyon çizilerek bulunan sürme itme ve sürme kesme kuvvetleri Şekil 5'de görülebilir.



Şekil 5. Sıfır kesilmemiş talaş kalınlığına çizilmiş doğrusal eğri

Figure 5. Linear curve fitting to a zero uncut chip thickness

Ölçülen kesme kuvvetlerinden sürme kuvvetleri çıkarıldığında gerçek kesme ve itme kuvvetleri elde edilir. Gerçek kesme ve itme kuvveti kullanılarak sürtünme katsayısı denklem 4 kullanılarak 0.41 olarak hesaplanmıştır.

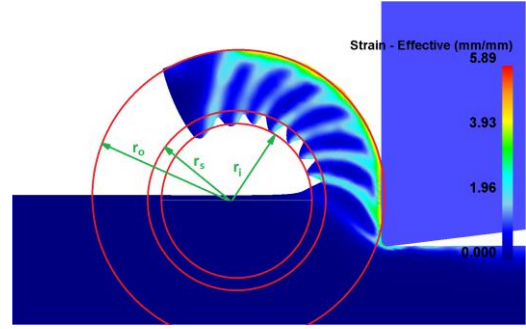
Bu çalışmada, kesici takım geometrisinin tırtıklı talaş oluşumuna etkisini incelemek için, 60 m/dak kesme hızında ve 0.1 mm kesilmemiş talaş kalınlığında talaşlı imalat simülasyonları yapılmıştır. Kesici takım geometrisi parametreleri Tablo 3'de özetlenmiştir.

Tablo 3. Simulasyonda denenen kesici takım geometrileri

Table 3. Cutting tool geometry used in simulation

| Talaş Açısı | Kenar Yarıçapı [µm] | Boşluk açısı |
|------------------|---------------------|----------------|
| -15 ⁰ | Keskin | 2 ⁰ |
| -10 ⁰ | 10 | 7 ⁰ |
| 0 ⁰ | 20 | |
| 10 ⁰ | 50 | |
| 15 ⁰ | | |

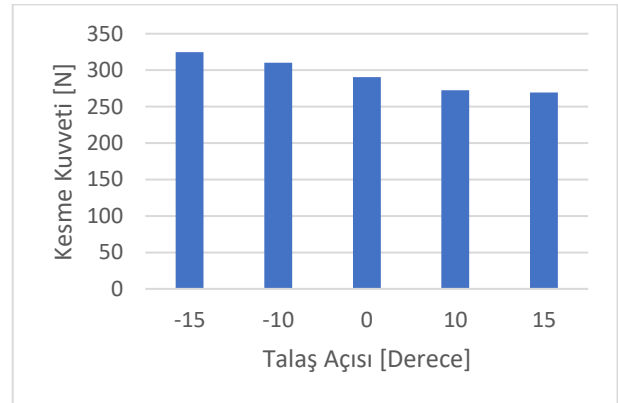
Tırtıklı talaşın derecesi, Şekil 6'da gösterildiği gibi tırtıklı talaş fenomenini [23] tanımlamak için dairenin üç yarıçapı kullanılarak ifade edilir. Şekil 6'ya göre, tırtıklı talaş derecesi şöyle tanımlanır.



Şekil 6. Tırtıklı talaşın derecesinin ölçülmesi
Figure 6. Measurement of degree of serration

Talaş açısının etkisi

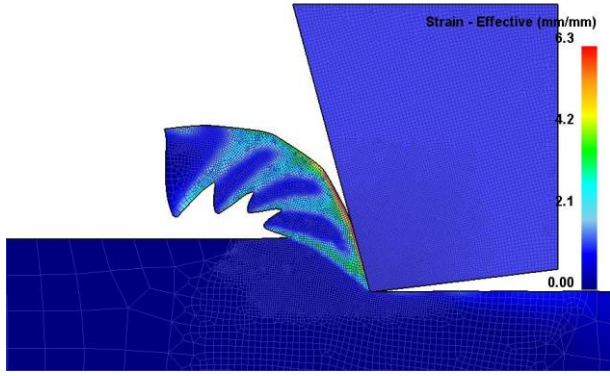
Talaş açısının talaş oluşumu üzerindeki etkisini analiz etmek için beş farklı talaş açısı (-15°, -10°, 0°, 10°, 15°) kullanılmıştır. Şekil 7'de, DEFORM yazılımı ile bulunan kesme kuvvetleri beş farklı talaş açısı (-15°, -10°, 0°, 10°, 15°), 7° boşluk açısı ve 10 µm kenar yarıçapı kullanılarak bulunmuştur. Şekil 8'de görülebileceği gibi, talaştaki testere dişlerinin talaş açısı arttıkça azaldığı görülebilir. Bu, talaş üzerindeki tırtık miktarı ile kesme kuvvetindeki dalgalanmalar arasında doğrudan bir ilişki olduğunu gösterir.



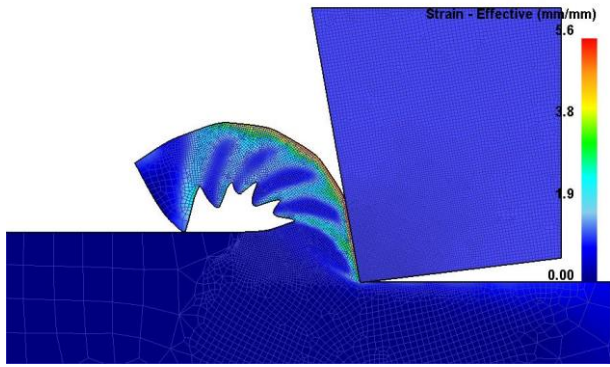
Şekil 7. Kesme açılarına göre kesme kuvvetleri

Figure 7. Cutting force at various rake angles

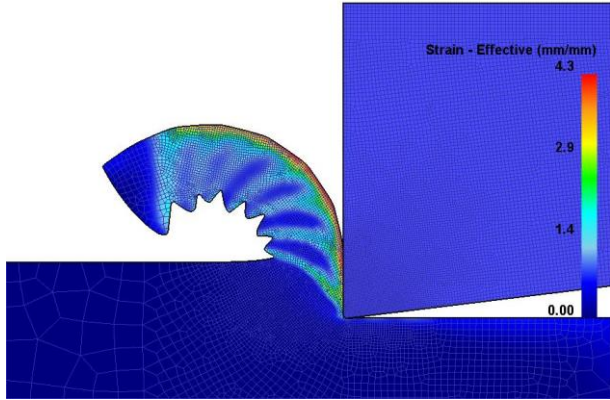
Şekil 8'te farklı talaş açıları için talaş morfolojisi gösterilmiştir.



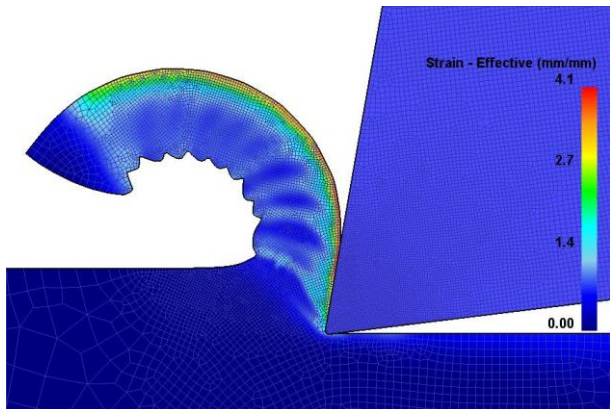
(a)



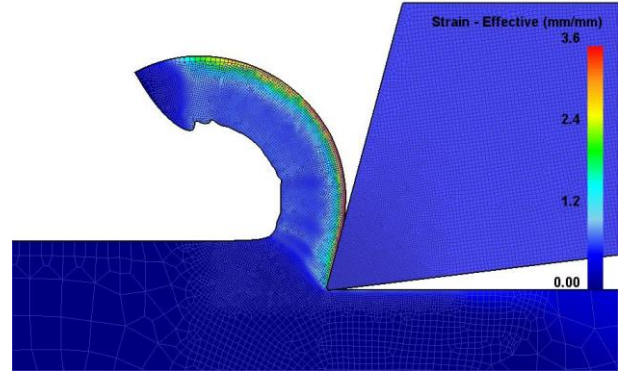
(b)



(c)



(d)

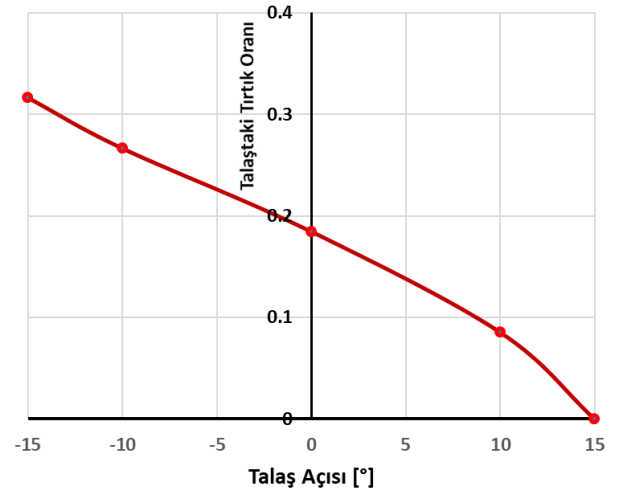


(e)

Şekil 8. Farklı talaş açılarında talaş morfolojisi a) Talaş açısı -15° b) Talaş açısı -10° c) Talaş açısı 0° d) Talaş açısı 10° e) Talaş açısı 15°

Figure 8. Chip morphology at various rake angles a) Rake -15° b) Rake -10° c) Rake 0° d) Rake 10° e) Rake 15°

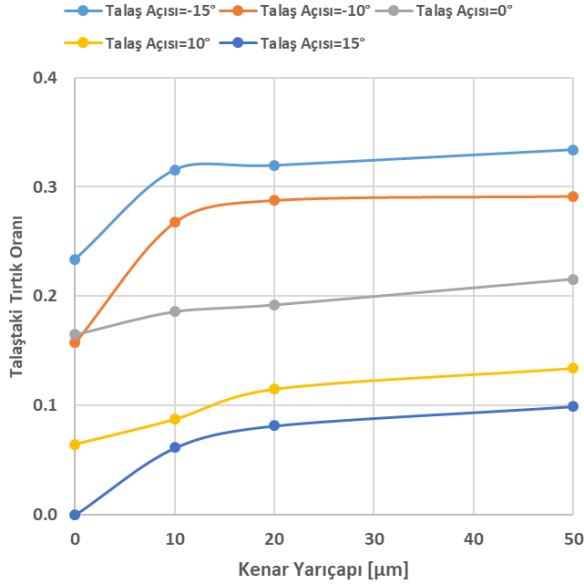
Şekil 8'de kenar yarıçapı ve boşluk açısının, tırtıklı talaş ve talaş eğrisi miktarının talaş açısının artmasıyla azaldığı ve talaş morfolojisi yüksek tırtıklı (-15° talaş açısı) olandan sürekli uzun talaşa (15° talaş açısı) evirildiği görülmektedir. Şekil 9'da talaş açısının fonksiyonu olarak talaş derecesi gösterilmektedir. Sonuçlar, talaş açısını artırarak talaş oranlarında bir düşüş olduğunu ortaya koymaktadır.



Şekil 9. Farklı talaş açıları için talaş derecesi. Figure 9. Degree of serration for different rake angles

Kenar yarıçapının etkisi

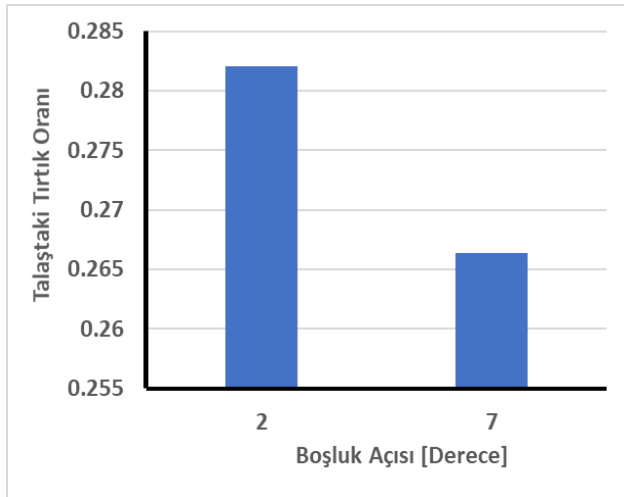
Kenar yarıçapı, metal kesme işleminde sürme (ploughing) kuvvetini doğrudan etkileyen bir değişkendir.



Şekil 10. Kenar yarıçapının talaştaki tırtık oranı üzerine etkisi.

Figure 10. Effect of edge radius on serration ratio

Farklı talaş açılarındaki farklı kenar yarıçapları ve 7° boşluk açısı için, talaştaki tırtık oranı Şekil 10'de gösterilmektedir. Kesici uç kenar yarıçapı arttıkça talaş derecesinin arttığı görülebilir.



Şekil 11. Farklı boşluk açısı için talaştaki tırtık oranı.

Figure 11. Serration ratio for different clearance angles

Boşluk açısının etkisi

2° ve 7° derecelik iki farklı boşluk açısı incelenmiştir. İki farklı boşluk açısının denenmesinin nedeni, boşluk açısı (clearance angle) sürtünme hareketinden dolayı sıfır veya negatif olamayacağı ve takım dayanıklılığını düşüreceği nedeniyle büyük olamamasıdır. Şekil 11'de, -10° talaş açısında ve 10 µm kenar yarıçapındaki talaştaki tırtık oranındaki değişim gösterilmektedir. Açıkça görülebileceği gibi boşluk açısı arttıkça, tırtıklı talaş oranı düşer. Benzer bir eğilim diğer kesici takım geometrileri için de gözlenmektedir.

Sonuç

Bu çalışmada, Ti-6Al-4V alaşımı işlenirken ortaya çıkan tırtıklı talaşın üzerindeki kesici takım geometrisinin etkisini incelemek için sonlu eleman yöntemi ile modellenmiştir. Bu çalışmanın sonuçları aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- Talaş açısının (rake angle) talaştaki tırtık oranı üzerinde önemli bir etkisi vardır ve talaş açısını artırdığımızda talaştaki tırtık oranını düşer. Bu, iş parçasının yaşadığı plastik deformasyon miktarı ile ilgilidir. Plastik deformasyon miktarı arttıkça, açığa çıkan ısı miktarı artar, ve dolayısıyla birincil deformasyon bölgesinde daha fazla ısı birikir. Bu talaştaki tırtık sayısının artmasıyla sonuçlanacaktır.
- Takımın kenarı yarıçapı arttıkça, talaştaki tırtık oranı da artmaktadır.
- Boşluk açısı artarken, talaş yüzü ile iş parçasının işlenmiş yüzeyi arasındaki sürtünme azaldığından, işleme sırasında üretilen ısı miktarı azalır. Bu, boşluk açısı artarken tırtıklı talaş derecesinin azalmasına neden olur.

Teşekkür

Yazarlar, 3D lazer taramalı mikroskobunun kullanımı için Bilkent Üniversitesi Mikro Sistem Tasarım ve İmalat Araştırma Merkezine teşekkür eder. Özellikle, Doç. Dr. Yiğit Karpat'a ve Dr. Şakir Baytaroğlu'na yardımlarından dolayı şükranlarımızı sunarız.

Kaynaklar

- [1] N. Khanna and K.S. Sangwan, *Interrupted machining analysis for Ti6Al4V and Ti5553 titanium alloys using physical vapor deposition (PVD)-coated carbide inserts*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2013. 227(3): p. 465-470.
- [2] C. Leyens and M. Peters, *Titanium and titanium alloys: fundamentals and applications*. 2003: John Wiley & Sons.
- [3] S.N.B. Oliaei and Y. Karpaz, *Built-up edge effects on process outputs of titanium alloy micro milling*. Precision Engineering, 2017. 49: p. 305-315.
- [4] D. Umbrello, *Finite element simulation of conventional and high speed machining of Ti6Al4V alloy*. Journal of materials processing technology, 2008. 196(1-3): p. 79-87.
- [5] F. Ducobu, et al., *Finite element prediction of the tool wear influence in Ti6Al4V machining*. Procedia Cirp, 2015. 31: p. 124-129.
- [6] H. Hong, et al., *Machinability of steels and titanium alloys under lubrication*. Wear, 1993. 162: p. 34-39.
- [7] M. Elbestawi, A. Srivastava, and T. El-Wardany, *A model for chip formation during machining of hardened steel*. CIRP annals, 1996. 45(1): p. 71-76.
- [8] N. Ueda, T. Matsuo, and K. Uehara, *An analysis of saw-toothed chip formation*. CIRP Annals, 1982. 31(1): p. 81-84.
- [9] G. Ye, et al., *Critical cutting speed for onset of serrated chip flow in high speed machining*. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2014. 86: p. 18-33.
- [10] A. Vyas and M. Shaw, *Mechanics of saw-tooth chip formation in metal cutting*. 1999.
- [11] G. Su, et al., *Influences of chip serration on micro-topography of machined surface in high-speed cutting*. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2015. 89: p. 202-207.
- [12] B. Li, et al., *Simulated and experimental analysis on serrated chip formation for hard milling process*. Journal of Manufacturing Processes, 2019. 44: p. 337-348.
- [13] R. Komanduri and R. Brown, *On the mechanics of chip segmentation in machining*. 1981.
- [14] X. Xu, et al., *Effect of morphological evolution of serrated chips on surface formation during high speed cutting Ti6Al4V*. Procedia CIRP, 2018. 77: p. 147-150.
- [15] X. Cui, et al., *Chip formation and its effects on cutting force, tool temperature, tool stress, and cutting edge wear in high-and ultra-high-speed milling*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016. 83(1-4): p. 55-65.
- [16] Y. Karpaz, *A modified material model for the finite element simulation of machining titanium alloy Ti-6Al-4V*. Machining Science and Technology, 2010. 14(3): p. 390-410.
- [17] M. Nikawa, et al., *FEM simulation for orthogonal cutting of Titanium-alloy considering ductile fracture to Johnson-Cook model*. Mechanical Engineering Journal, 2016. 3(2): p. 15-00536-15-00536.
- [18] M. Calamaz, D. Coupard, and F. Girot, *A new material model for 2D numerical simulation of serrated chip formation when machining titanium alloy Ti-6Al-4V*. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2008. 48(3-4): p. 275-288.
- [19] M. Sima and T. Özel, *Modified material constitutive models for serrated chip formation simulations and experimental validation in machining of titanium alloy Ti-6Al-4V*. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2010. 50(11): p. 943-960.
- [20] M. Yaich, et al., *A 2D finite element analysis of the effect of numerical parameters on the reliability of Ti6Al4V machining modeling*. Machining Science and Technology, 2020: p. 1-35.
- [21] L. Li and N. He. *A FEA study on mechanisms of saw-tooth chip deformation in high speed cutting of Ti-6Al-4V alloy*. in *Fifth international conference on high speed machining (HSM), Metz, France*. 2006.
- [22] Y. Guo and Y. Chou, *The determination of ploughing force and its influence on material properties in metal cutting*. Journal of Materials Processing Technology, 2004. 148(3): p. 368-375.
- [23] B. Wang and Z. Liu, *Shear localization sensitivity analysis for Johnson-Cook constitutive parameters on serrated chips in high speed machining of Ti6Al4V*. Simulation Modelling Practice and Theory, 2015. 55: p. 63-76.