

Okan Deniz Yılmaz* 

Atılım Üniversitesi
İmalat Mühendisliği Bölümü
Ankara

Samad Nadimi Bavil
Oliaei 

Atılım Üniversitesi
Makine Mühendisliği Bölümü
Ankara

Makale Bilgisi:

Araştırma Makalesi 22-01-2020

Gönderilme: Kabul: 14-02-2020

*Sorumlu Yazar: Okan Deniz Yılmaz
Email: okan.yilmaz@atilim.edu.tr

Alüminyum Al6061-T6'nın İşlenmesinde Sürme Kuvvetinin Hesaplanması ve Sürtünme Katsayısının Etkisinin Araştırılması

Metal kesme işlemlerinde, takım kenar yarıçapının (edge radius) etkisiyle ortaya çıkan sürme (ploughing) kuvveti takım aşınması, akış geriliminin tahmini, talaş oluşum mekanizması, yüzey kalitesi ve metal kesme işleminin sonlu elemanlar yöntemi ile modellenmesi açısından önemli bir değişkendir. Literatürde, sürme (ploughing) kuvveti kararlı hale (steady state) gelmiş metal kesme işlemlerindeki periyodik (cyclic) kuvveti temel olarak tahmin edilebilmiştir. Fakat periyodik (cyclic) kuvvet çoğu metal kesme işlemlerinde ortaya çıkmamaktadır. Bu makalede, sürme kuvveti kesilmemiş talaş kalınlığını (uncut chip thickness) ekstrapolasyon yöntemi ile sıfıra yakınsayarak tahmin edilmiştir. Sürme (ploughing) kuvvetinin bu yöntem ile tahmin edilmesinden sonra Coulomb sürtünme katsayısı hesaplanılarak yapılan varsayımın doğru olup olmadığı karşılaştırılmıştır. Tahmin edilen sürme (ploughing) kuvveti, kesilmemiş talaş kalınlığına karşı çizildiğinde daha homojendir ve Coulomb sürtünme değeri literatürde bulunan sürtünme kuvvetleriyle oldukça yakın çıkmıştır. Bu yüzden, periyodik (cyclic) kuvvetin oluşmadığı metal kesme işlemlerinde, sürme (ploughing) kuvvetini ekstrapolasyon yöntemi ile tahmin etmek ve Coulomb sürtünme değerini hesaplamak kabul edilebilir görünmektedir.

Anahtar Kelimeler: Alüminyum Al6061-T6, Talaşlı İmalat, Sürme Kuvveti, Coulomb Sürtünme Katsayısı

GİRİŞ

Kesme kuvvetleri, talaşlı imalat yöntemlerinde kesici takımın izlenmesi [1, 2], parça veya takım sapmalarının öngörülmesi [3, 4], malzeme akış stresinin hesaplanması [5-9], işleme yöntemlerinin belirlenmesi [10], tezgâh tasarımlarında ve takım tasarımlarında ve seçilmesinde uzun zamandır kullanılmaktadır. Kesici takımlar, takımın yanı (tool flank) ile kesme yüzeyi arasında keskinliğe (tool sharpness) ve temasa (tool contact) sahiptir. Takım hiçbir zaman tamamen keskin olamaz ve bu takım kenar yarıçapı (edge radius) oluşmasına neden olur. Sürme (ploughing) kuvvetini ortaya çıkarır. Sürme kuvveti, talaş oluşumu başlamadan hemen önce ölçülen kuvvet olarak varsayılabilir. Kısaca, sürme kuvveti sıfır kesilmemiş talaş kalınlığında (uncut chip thickness) ortaya çıkan kuvvet denilebilir [9]. Bu sayede, metal kesme işlemlerindeki büyüklük etkisi (size effect) denilen etkiyi açıklayabilir [11]. Sürme (ploughing) kuvveti, takım aşınmasının izlenmesinde, akış stresinin hesaplanmasında, talaş oluşma mekanizmasında ve yüzey kalitesinde oldukça önemli bir değişkendir. İlaveten, kesme kuvvetinin, sıcaklığın

ve yüzey kalitesinin sonlu elemanlar yöntemi ile modellenmesinde tam keskin takım kullanılması varsayımının değerlendirilmesinde sürme (ploughing) kuvveti oldukça yararlıdır. Sürme (ploughing) kuvvetinin ölçülen kesme kuvvetlerinden ayırmak oldukça zordur. Bu yüzden, sürme (ploughing) kuvvetinin belirlenebilmesi için teknik yöntemler geliştirilmeye çalışılmıştır. Ekstrapolasyon yöntemi, ölçülen kuvvet verisi ile kesilmemiş talaş kalınlığını (uncut chip thickness) sabit kesme hızında çizdirerek sıfır kesilmemiş talaş kalınlığına (uncut chip thickness) denk gelen kesme kuvvetini saptamaktır. Sıfır kesilmemiş talaş kalınlığına denk gelen kesme kuvveti sürme kuvveti olarak varsayılır [12-15]. Bu yöntem, birçok araştırmacı [16-19] tarafından gerinim, gerinim oranı, sıcaklık ve takım/talaş temas uzunluğu dikkate alınmadığı için doğruluğu sorgulanmıştır. Colwell'in çalışmasından esinlenilerek [20], sıfır kesilmemiş talaş kalınlığı yöntemimin, kesme işlemi kararlı hale geldikten ve kesme işlemi henüz bitmeden kesme kuvvetinin ölçülmesi ile yapılması gerekmektedir. Ekstrapolasyon yöntemi ile düzeltilen kesme kuvvetlerini kullanarak, Stevenson ve

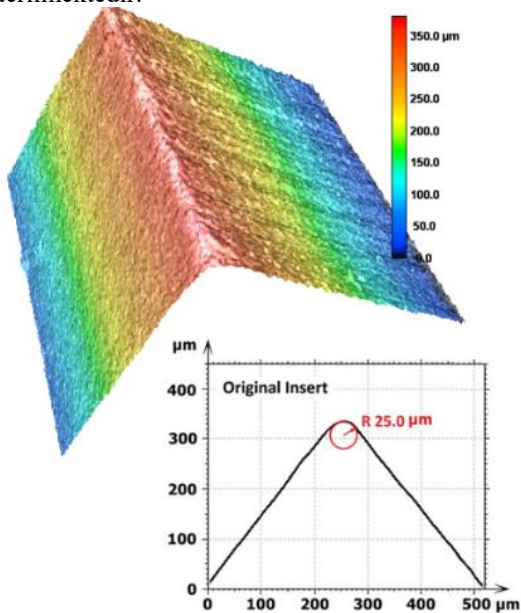
Stephenson [21] ve Stevenson [9] bu yöntemin çoğu koşulda geçerli olduğunu göstermiştir. Ekstrapolasyon yöntemi ile düzeltilen kesme kuvvetlerine bakılarak, malzeme modeli tahminleri ve malzeme akış gerilmeleri arasında makul bir anlaşma vardır [8].

DENEYSEL YÖNTEM

Kesme deneyleri, BT40 tipi takım tutucu ile Akira Seiki Performa SR3-XP dikey işleme makinesi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Dikey kesme deneylerini yapabilmek için, 30 mm dış, 26 mm iç çapa ve 2 mm et kalınlığına sahip içi boş silindirik iş parçası Alüminyum Al6061-T6 malzeme kullanılarak hazırlanmıştır. Silindirik iş parçasının iç derinliği esnemez bir iş parçası elde etmek ve titreşimleri önlemek için kısa tutulmuştur. Dikey kesme deneyleri, 0° talaş (rake angle) açısı ve 7° boşluk (clearance angle) açısına sahip kaplamasız tungsten karbür takım (DCMW 11 T3 04H13A) kullanılarak yapılmıştır.

Takımın kenar yarıçapı (edge radius), 3D lazer tarama mikroskobu kullanılarak 25 µm ölçülmüştür ve Şekil 1'de görülebilir. Kesme kuvvetleri, bir akım yükseltici (Type 5070), Kistler DAQ (Type 5697) veri toplayıcı ve Kistler 9441B takım tutucu yerleştirilmiş 3 bileşenli elmasa sahip Kistler 9265B dinamometre kullanılarak ölçülmüştür. Ölçülen kesme ve itme kuvvetleri, alçak geçirmen filtre (low-pass filter) kullanılarak gürültüden temizlenmiştir. Şekil 2'de deney düzeneği gösterilmiştir.

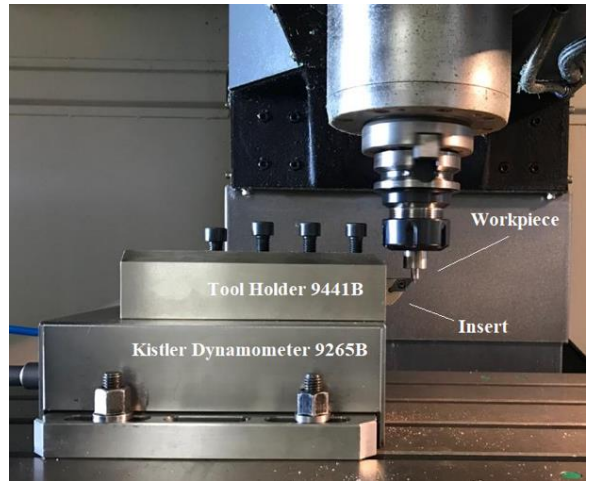
Deneylerde kullanılan Alüminyum Al6061-T6 malzemesinin kimyasal bileşenleri Tablo 1'de gösterilmektedir.



Şekil 1. 3D lazer taramalı mikroskop ile takımın kenar yarıçapının ölçülmesi

Tablo 1. Alüminyum 6061-T6 Malzemesinin Kimyasal Bileşimi

Bileşen	Oranı (%)
Al	95.8 - 98.6
Cr	0.04 - 0.35
Cu	0.15 - 0.4
Fe	maks. 0.7
Mg	0.8 - 1.2
Mn	maks. 0.15
Si	0.4 - 0.8
Ti	maks. 0.15
Zn	maks. 0.25
Diğer, her biri	maks. 0.05
Diğer, hepsi	maks. 0.15



Şekil 2. Dikey kesme işleminin deney düzeneği

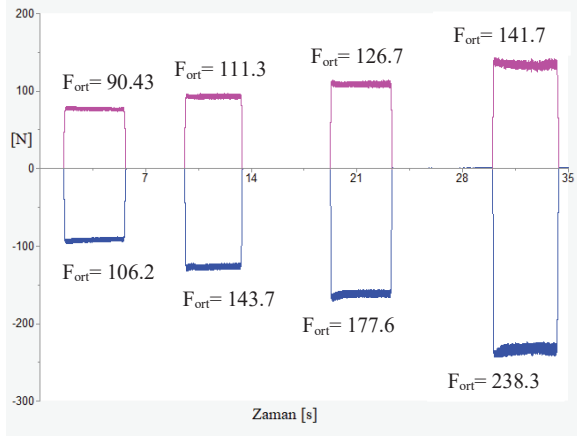
Daha yüksek sertlik ve kesici takım titreşimlerini en aza indirmek için 16 x 16 mm kesitli takım tutucu (SDACR 1616K 11-S) kullanılmıştır. Her kesme deneyi, takım aşınması dikkate alındığından sıfır kesici takım ile yapılmıştır.

SÜRME (PLOWING) KUVVETİ

Farklı kesilmemiş talaş kalınlıkları (0.05, 0.75, 0.1 ve 0.15 (mm/rev)) ve farklı kesme hızlarında (200, 400, 600, 800 ve 1000 (m/dak)) yapılan dikey kesme deneyleri ile kesme ve itme kuvvetleri ölçülmüştür. Her iki kuvvet bileşeni de beklenildiği gibi kesilmemiş talaş kalınlığı artarken artmaktadır.

Ölçülen kuvvet verilerinden sürme kuvvetini hesaplamak için ekstrapolasyon yöntemi kullanılmıştır. Ekstrapolasyon yöntemi, kesme ve itme kuvvetlerinin talaş kalınlığı ile doğrusal olarak arttığı varsayımına dayanmaktadır. Kesme ve itme

kuvvetleri, takımın kenar yarıçapı nedeniyle sürme kuvvetlerinden etkilenir ve sürme kuvvetinin dikey kesme deneylerine tam olarak dâhil olduğu varsayılır. Bu yüzden, kesilmemiş talaş kalınlığı artarken sürme kuvveti değişmez ve takım ile talaş arasında sürtünme katsayısı kesilmemiş talaş kalınlığından bağımsızdır. Dinamometreden ölçülen kesme ve itme kuvvetleri Şekil 3'de görülebilir.



Şekil 3. Al6061-T6'nın 1000 m/dak'da dikey kesme deneylerinde ölçülen kesme(mavi) ve itme(pembe) kuvvetleri

Kesme ve itme kuvvetleri ile kesilmemiş talaş kalınlığına doğrusal fonksiyon olarak çizilebilir. Sürme kuvvetleri, kesilmemiş talaş kalınlığı 0 alınarak doğrusal bir fonksiyon kullanılarak hesaplanabilir. Ortaya çıkan doğrusal fonksiyon ve sürme kuvvetleri Şekil 4'de gösterilmiştir.

Şekil 4'de gösterilen iki çizginin eğimi, sürme kuvvetinin yönünün kesici takımın kenar yarıçapının büyüklüğü ile değiştiğini gösterir.

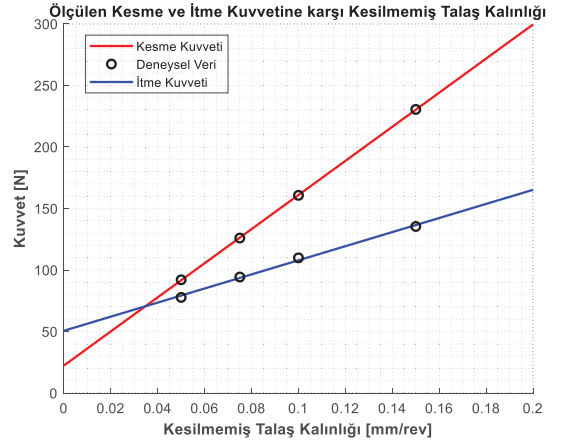
COULOMB SÜRTÜNME KATSAYISI

Takım/talaş ve takım/iş parçası ara yüzündeki sürtünmenin, işleme yönteminin çıktılarının tahmin edilebilmesinde önemli bir etkisi vardır. Coulomb sürtünme katsayısını hesaplamak için, ölçülen kesme (F_c^m) ve itme (F_t^m) kuvvetlerinden sürme kuvveti (F_c^p, F_t^p) çıkarılarak gerçek kesme kuvveti (F_c^c) ve gerçek itme kuvveti (F_t^c) Guo ve Cho'nun [22] belirttiği gibi hesaplanması gerekmektedir. Gerçek kesme ve itme kuvvetleri Denklem (1) ve (2) kullanılarak hesaplanabilir.

$$F_c^c = F_c^m - F_c^p \quad (1)$$

ve

$$F_t^c = F_t^m - F_t^p \quad (2)$$



Şekil 4. Al6061-T6'nın 1000 m/dak'da ekstrapolasyon yöntemi ile bulunmuş kesme ve itme kuvvetleri

Sürme kuvveti bileşenleri (F_c^p, F_t^p) kesilmemiş talaş kalınlığını sıfıra ekstrapolasyon yöntemi ile yakınsayarak elde edilir. Sürme kuvvetinin kesme ve itme bileşenlerinin büyüklüğünü bilerek, takım/talaş ara yüzündeki Coulomb sürtünme katsayısını hesaplamak daha doğru olacaktır.

$$\mu = \frac{F_c^c \sin \gamma + F_t^c \cos \gamma}{F_c^c \cos \gamma - F_t^c \sin \gamma} \quad (3)$$

Sürme kuvveti çıkarıldıktan sonra elde edilen kesme ve itme kuvveti, metal kesme işleminde talaşın açığa çıkması için gereken gerçek kesme ve itme kuvvetleridir. Bu sayede, takım/talaş ara yüzünde Coulomb sürtünme katsayısı Denklem (3) kullanılarak hesaplanabilir. Denklem (3)'de kullanılan γ takımın talaş açısıdır ve kuvvetler ölçülen kesme ve itme kuvvetlerinden sürme kuvvetinin çıkarılması ile hesaplanan kuvvetlerdir.

Tablo 2, farklı kesme hızlarında ve kesilmemiş talaş kalınlığında Coulomb sürtünme katsayısını göstermektedir. Bu sonuçlar, kesme hızı artarken ölçülen kuvvet değerlerinin ve Coulomb sürtünme katsayısının düştüğünü göstermektedir.

SONUÇ

Bu çalışmada, metal kesme işlemlerinde sürme kuvvetinin hesaplanmasını ve bunun malzeme özellikleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır.

- Sürme kuvveti, ölçülen kesme ve itme kuvvetlerini kesilmemiş talaş kalınlığını sıfıra yakınsama yöntemi sayesinde tahmin edilebilmiştir.
- Sürme kuvvetinin tahmin edilebilmesi, Coulomb sürtünme katsayısının gerçek kesme ve itme kuvvetleri ile hesaplanabilmesini sağlamıştır.

- Kesme hızı arttıkça kesme ve itme kuvvetlerinin azaldığı gözlemlenmiştir.
- Kesme hızı arttığında Coulomb sürtünme katsayısının azaldığı gözlemlenmiştir.
- Sabit kesme hızında kesilmemiş talaş kalınlığı artırıldığında kesme ve itme kuvvetleri beklenildiği gibi yükselmiştir.
- Coulomb sürtünme katsayısı, sürme kuvveti dikkate alınmadan ölçülen kesme ve itme kuvvetleri ile hesaplandığında literatür ile uyumlayan çok büyük rakamlar çıkmaktadır.

INVESTIGATION OF THE CALCULATION PLOUGHING FORCE AND THE EFFECT OF FRICTION COEFFICIENT IN MACHINING OF ALUMINUM 6061-T6

In metal cutting operations, the ploughing force, which occurs due to the effect of edge radius of the tool that is an essential factor in terms of tool wear, prediction of flow stress, chip formation mechanism, surface quality and finite element modeling of metal cutting operations. In the literature, the ploughing force was estimated based on the cyclic force in steady state metal cutting operations. However, cyclic force does not occur in most metal cutting operations. In this

article, the ploughing force was estimated by integrating uncut chip thickness to zero value by using extrapolation method. After estimating the ploughing force by this method, the Coulomb friction coefficient can be calculated and the precision of the assumption is compared. The estimated ploughing force is more homogeneous when plotted against uncut chip thickness, and the Coulomb friction coefficient is quite accurate to friction value which found in the literature. Hereby, the assumption is acceptable to estimate the ploughing force by using extrapolation method and the calculation of the Coulomb friction is valid in metal cutting operation which cyclic force does not occur.

Keywords: Aluminum Al6061-T6, Metal Cutting, Ploughing Force, Coulomb Friction Coefficient

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.

Tablo 2. Al6061-T6'nın Coulomb sürtünme katsayısının hesaplanması

Kesme Hızı (m/dak)	Kesilmemiş Talaş Kalınlığı (mm/rev)	Kesme Kuvveti F_c^m (N)	İtme Kuvveti F_t^m (N)	Sürme Kuvveti (N)	Coulomb Sürtünme Katsayısı
200	0.05	142.7	130.5	$F_c^p = 67.7$ $F_t^p = 89.64$	0.615
	0.075	195.3	173.2		
	0.1	238.3	201.7		
	0.15	308.9	236.1		
400	0.05	124.8	112	$F_c^p = 56.39$ $F_t^p = 83.46$	0.512
	0.075	172.8	151.1		
	0.1	207.4	165.8		
	0.15	275.5	194		
600	0.05	122.7	112.4	$F_c^p = 49.04$ $F_t^p = 76.51$	0.477
	0.075	156.6	126.1		
	0.1	195	147.4		
	0.15	267.4	180.6		
800	0.05	113.2	98.04	$F_c^p = 36.7$ $F_t^p = 65.01$	0.457
	0.075	151	117.1		
	0.1	195	142.9		
	0.15	266.9	168.5		
1000	0.05	106.2	90.43	$F_c^p = 43.47$ $F_t^p = 70.2$	0.373
	0.075	143.7	111.3		
	0.1	177.6	126.7		
	0.15	238.3	141.7		

KAYNAKÇA

1. Y. Altintas and I. Yellowley, "In-process detection of tool failure in milling using cutting force models." 1989.
2. M. Elbestawi, T. Papazafiriou, and R. Du, "In-process monitoring of tool wear in milling using cutting force signature." *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 1991. 31(1): pp. 55-73.
3. J. Sutherland and R.E. Devor, "An improved method for cutting force and surface error prediction in flexible end milling systems." 1986.
4. Y. Altintas, D. Montgomery, and E. Budak, "Dynamic peripheral milling of flexible structures." 1992.
5. M.C. Shaw and J. Cookson, "Metal cutting principles. Vol. 2. 2005: Oxford university press New York.
6. M.E. Merchant, "Mechanics of the metal cutting process. I. Orthogonal cutting and a type 2 chip." *Journal of applied physics*, 1945. 16(5): pp. 267-275.
7. R. Stevenson, "Study on the correlation of workpiece mechanical properties from compression and cutting tests." *Machining science and technology*, 1997. 1(1): pp. 67-79.
8. Y. Guo, "An integral method to determine the mechanical behavior of materials in metal cutting." *Journal of Materials Processing Technology*, 2003. 142(1): pp. 72-81.
9. R. Stevenson, "The measurement of parasitic forces in orthogonal cutting." *International journal of machine Tools and manufacture*, 1998. 38(1-2): pp. 113-130.
10. H. Tönshoff, H.-G. Wobker, and D. Brandt, "Hard turning-influences on the workpiece properties." *Transactions-North American Manufacturing Research Institution of Sme*, 1995: pp. 215-220.
11. G. Boothroyd, "Fundamentals of metal machining and machine tools. Vol. 28. 1988: Crc Press.
12. P. Albrecht, "New developments in the theory of the metal-cutting process: part I. The ploughing process in metal cutting." *Journal of engineering for industry*, 1960. 82(4): pp. 348-357.
13. P. Wallace and G. Boothroyd, "Tool forces and tool-chip friction in orthogonal machining." *Journal of Mechanical Engineering Science*, 1964. 6(1): pp. 74-87.
14. T. HSU. "A study of normal and shear stresses on a cutting tool". in *Mechanical Engineering*. 1965. Asme-Amer Soc Mechanical Eng 345 E 47TH ST, New York, NY 10017.
15. J. Baiey, "Friction in metal machining mechanical aspects." *Wear*, 1975. 31(2): pp. 243-275.
16. W. Palmer and P. Oxley, "Mechanics of orthogonal machining." *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, 1959. 173(1): pp. 623-654.
17. M.E. Abdelmoneim and R. Scrutton, "Tool edge roundness and stable build-up formation in finish machining." 1974.
18. M.E. Abdelmoneim, "Comments on "Friction in metal machining—mechanical aspects". " *Wear*, 1976. 38(2): pp. 391-392.
19. J. Williams and N. Gane, "Some observations on the flow stress of metals during metal cutting." *Wear*, 1977. 42(2): pp. 341-353.
20. L. Colwell, "Methods for sensing the rate of tool wear." *Annals of the CIRP*, 1971. 19(4): pp. 647-651.
21. R. Stevenson and D.A. Stephenson, "The mechanical behavior of zinc during machining." 1995.
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): pp. 368-375.