



TI-6AL-4V SICAK İŞLENMESİ ÜZERİNE ETKİLERİNİN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE İNCELENMESİ

Levent UĞUR*

Amasya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Amasya, Türkiye

Anahtar Kelimeler

Kesme Kuvveti,
Sıcaklık,
Sıcak İşleme,
Sonlu Elemanlar Yöntemi,
Ti-6Al-4V.

Öz

Sıcak işleme olarak bilinen ısı destekli işleme, kesilmesi zor metallerin ve alaşımların işlenebilirliğini artırmak için alternatif bir işleme yöntemidir. Bu çalışma, endüstride yaygın olarak kullanılan Ti-6Al-4V alaşımının sıcak işlenmesinde kesme kuvvetlerinin sonlu elemanlar yöntemi ile incelenmesini içermektedir. İşleme deneyleri sonlu elemanlar analiz yazılımı olan ThirdWave AdvantEdge programında yapılmıştır. Bu analizlerde sabit kesme derinliğinde, kesme hızı (V), ilerleme hızı (f), ve sıcaklık parametreleri üçer seviye olarak belirlenmiştir. Deney listesi Taguchi L_9 ortogonal dizilim ile oluşturulmuştur. L_9 deney tasarımına göre kesme kuvvetleri değerleri kaydedilmiştir. Nümerik analiz sonuçlarına göre oda sıcaklığı koşullarının sıcak işleme koşullarına göre karşılaştırıldığında kesme kuvvetlerinin azaldığı görülmüştür. En düşük kesme kuvveti değeri 600°C sıcak işleme şartlarında gerçekleştirilen sayısal analizlerde ölçülmüştür.

EXAMINATION OF THE EFFECTS ON THE HOT MACHINING OF TI-6AL-4V WITH THE FINITE ELEMENT METHOD

Keywords

Cutting Force,
Temperature,
Hot Machining,
Finite Element Method,
Ti-6Al-4V.

Abstract

Heat assisted machining, known as hot machining, is an alternative machining method to increase the machinability of hard-to-cut metals and alloys. This study includes the investigation of cutting forces in hot working of Ti-6Al-4V alloy, which is widely used in the industry, by finite element method. Processing experiments were performed with ThirdWave AdvantEdge, the finite element analysis software. Analyzes were determined at constant depth of cut, cutting speed (V), feed rate (f), and temperature parameters were determined as three levels. Experiment list was created with Taguchi L_9 orthogonal array. Cutting forces values were recorded according to the L_9 experimental design. According to the results of the numerical analysis, it was observed that the cutting forces decreased when the room temperature conditions were compared with the hot machining conditions. The lowest cutting force value was measured in numerical analyzes carried out at 600°C hot machining conditions.

Alıntı / Cite

Uğur, L., (2022). Ti-6al-4v Sıcak İşlenmesi Üzerine Etkilerinin Sonlu Elemanlar Yöntemi İle İncelenmesi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 10(2), 532-537.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

L.Uğur, 0000-0003-3447-3191

Makale Süreci / Article Process

Başvuru Tarihi / Submission Date	20.10.2021
Revizyon Tarihi / Revision Date	19.12.2021
Kabul Tarihi / Accepted Date	19.12.2021
Yayın Tarihi / Published Date	30.06.2022

1. Giriş (Introduction)

Talaşlı imalat, istenilen şekil ve boyutu üretmek için iş malzemesinden istenmeyen malzemeyi uzaklaştıran bir kesme işlemidir (Kalpakjian, 2001). Günümüzde çeliklerin tornalama, frezeleme ve delme gibi işleme süreçleri talaşlı imalat endüstrilerinde önemli bir yere sahiptir. Bu yöntemlerden en çok kullanılan işleme yöntemlerinden biri tornalamadır (Sahoo, Rout, & Das, 2015). Talaşlı imalatla sıklıkla kullanılan malzemelerden biri de titanyum

* İlgili yazar / Corresponding author: levent.ugur@amasya.com, +90-358-260 00 68 (1483)

alaşımalarıdır. Titanyum alaşımları, mükemmel mekanik özellikleri, yüksek korozyon ve kırılma direncine sahip olduğu için havacılık, nükleer, biyomedikal ekipman ve otomobil sektörlerinde yaygın olarak kullanılan malzemelerdir (Ma, Andrus, Condoor, & Lei, 2015; Ulutan & Ozel, 2011). Bahsedilen bu özelliklerden dolayı titanyum alaşımları geleneksel yöntemler ile işlenirken kesici kenar üzerinde yüksek sıcaklık ve basınç meydana gelmekte bu da takım ömrünü kısalmaktadır (Rashid, Birmingham, Sun, Wang, & Dargusch, 2013). Titanyum mekanik özelliklerinden dolayı avantajlı olsa da, talaşlı imalat endüstrileri için büyük zorluklar taşımaktadır (Smith, Schukken, & Gröhn, 2015).

Bu tür kesilmesi zor malzemelerin ve alaşımların işlenmesinde sıcak işleme veya ısı destekli işleme en etkili yollardan biridir. Sıcak işleme veya ısı destekli işleme prosesleri bir ısı kaynağı kullanılarak (gaz alevi, plazma ark, elektrik arkı, indüksiyon ısıtma, fırın ısıtma ve lazer ısıtma) malzemesinin kesme mukavemetini azaltmaktır (Ginta & Amin, 2013; Sun, Brandt, Barnes, & Dargusch, 2011; Upadhyay, Jain, & Mehta, 2013). Bu yöntemlerin her birinin kendisine göre avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır. Sıcak işleme teknikleri talaşlı imalatta genellikle tornalama ve frezelemede kullanılmaktadır (Sofuoğlu, Çakır, Gürgen, Orak, & Kuşhan, 2018).

Literatürde kesilmesi zor malzemelerin işlenmesinde sıcak işlemenin kullanılmasını araştıran çeşitli makaleler bulunmaktadır. Zamani ve diğerleri, Ti6Al4V alaşımının lazer destekli kenar frezelemesinin sayısal ve deneysel araştırmasını incelemişlerdir. Lazerle ısıtma işlemi ile ve lazerle ısıtma olmadan kesme kuvvetini tahmin etmek için bir 3D modelleme yapılmıştır. Simülasyon için Johnson-cook malzeme modeli kullanılarak ve lazerle ısıtmanın kesme kuvvetini ve takım aşınmasını azalttığını bulmuşlardır (Zamani, Hermani, Sonderegger, & Sommitsch, 2012). Akasawa ve ark., sert çeliğin sıcak işlenmesi için elektrikli ısıtma kullanılarak kesilmesini, soğutulmuş kesici takım ile kesilmesini araştırmışlardır. Çeşitli takım malzemelerinin sıcak işleme testinde takım malzemesinin oksidasyon testi ve takım soğumasının etkisi incelenmiştir (Akasawa, Takeshita, & Uehara, 1987). İşlenebilirliği artırmak için plazmanın bir ısıtma kaynağı olarak kullanılması farklı araştırmacılar tarafından da incelenmiştir (Leshock, Kim, & Shin, 2001). Elkhateeb ve ark. Ti6Al4V/TiC kompozitlerin kesimine lazer ısıtmayı dahil etmişlerdir. İş parçasının azaltılmış yük transfer kapasitesi nedeniyle, normal ve teğetsel kuvvetler sırasıyla %78 ve %37 oranında azaltılmasının yanında takım aşınmasının da %68 oranında azaltıldığı görülmüştür (Elkhateeb & Shin, 2019). Diğer bir çalışmada, minimum miktarda yağlama ile Ti6Al4V alaşımının lazer destekli işlenmesinde, geleneksel işleme göre takım aşınmasının %49,1 yüzey pürüzlülüğünün ise %33,7 azaldığı kaydedilmiştir (Luan et al., 2021). Muhammed ve arkadaşları, sonlu elemanlar yöntemi (FEM) ile sıcak delmeyi incelemişlerdir. Geleneksel delme ile karşılaştırıldığında, yüksek bir sıcaklıkta tork ve itme kuvvetinde azalma gözlemlenmiştir (Muhammad, Ahmed, Shariff, & Silberschmidt, 2012). Talaşlı imalatta sonlu elemanlar yöntemi ile yapılan birçok çalışma bulunmaktadır (Alatrushi, Bedir, & Yılmaz, 2020; Karagüzel, 2019; A. Parida & Maity, 2016; A. K. Parida & Maity, 2019; Ugur, 2019; Uğur & Kazan, 2020).

Literatürdeki çalışmalar dikkate alındığında sıcak işlemeyle ilgili deneysel ve sayısal çeşitli çalışmaların olduğu görülmektedir. Bu çalışmada, kesme kuvveti açısından titanyum 6Al-4V ELI (grade 5) alaşımının sıcak işlenebilirliğinin sayısal olarak değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Deney tasarımı olarak Taguchi L9 ortogonal dizi kullanılmıştır. Kesme kuvveti için optimum kesme parametreleri Taguchi analizi ile belirlenmiştir.

2. Materyal ve Metot (Material And Method)

Bu çalışmada havacılık, nükleer, biyomedikal ekipman ve otomobil sektörlerinde yaygın olarak kullanılan Ti-6Al-4V alaşımı \varnothing 30 mm boyutlarında seçilmiştir. Ti-6Al-4V alaşımının kimyasal bileşimi ve mekanik özellikleri sırası ile Tablo 1 ve Tablo 2'de gösterilmiştir.

Tablo 1. Ti-6Al-4V kimyasal bileşimi (Chemical composition of Ti-6Al-4V)

Element	Al	V	C	Fe	Si	O	Fe	Ti
%	5.50	3.50	0.08	0.30	0.05	0.20	0.30	Balance

Tablo 2. Ti-6Al-4V Termo mekanik özellikleri (Thermo mechanical properties of Ti-6Al-4V) (Pan, Liang, Garmestani, & Shih, 2016)

Properties	Ti-6Al-4V
Young's modulus (MPa)	0.714T + 113.34*103
Density (kg/m ³)	4430
Poisson's ratio	0.34
Heat capacity (J/kg °C)	50.564exp(0.0007T)
Conductivity (W/(m °C))	7.039exp(0.0011T)
Expansion (µm/(m °C))	3*10 ⁻⁹ + 7*10 ⁻⁶

Talaşlı imalat simülasyonlarında, yüksek seviyedeki plastik gerinim, gerinim oranı ve sıcaklığa bağlı olarak iş parçalarında deformasyon meydana gelmektedir. Bu nedenle iş parçalarının gerilme-şekil değiştirme davranışı tanımlanırken gerinim hızına, iş sertleşmesine ve sıcaklığa bağlı olarak malzeme modelleri kullanılmaktadır (Rao, Dandekar, & Shin, 2011; Shrot & Bäker, 2012). Bu çalışmada, iş parçasının mekanik davranışını tanımlamak için Johnson-Cook akma yüzeyi oluşturucu malzeme modeli kullanılmıştır. Johnson-Cook malzeme modeli, iş parçasının akış gerilimi için eşitlik 1'de olduğu gibi kullanılmaktadır.

$$\sigma = \underbrace{[A + B\varepsilon^n]}_{\text{Elasto-Plastic}} \underbrace{\left[1 + C \ln\left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}\right)\right]}_{\text{Viscosity}} \underbrace{\left[1 - \left(\frac{T - T_{room}}{T_{melt} - T_{room}}\right)^m\right]}_{\text{Thermal Softening}} \quad (1)$$

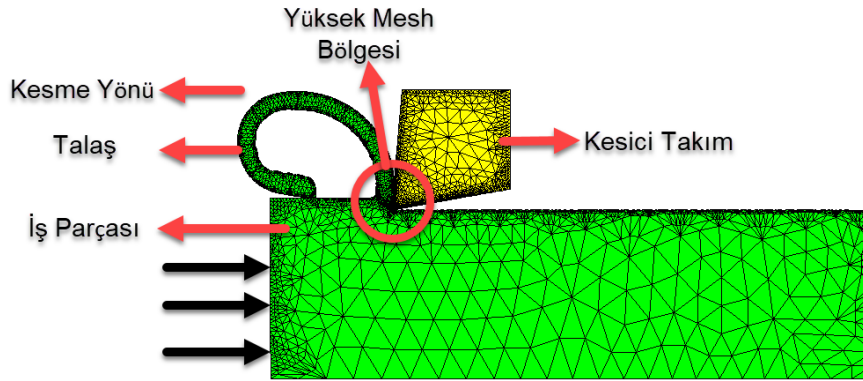
AdvantEdge™, aşağıdaki denklemde Coulomb sürtünmesi tarafından tanımlanan bir sürtünme katsayısı kullanır:

$$F_f = \mu F_n \quad (2)$$

Tornalama işleminin sayısal analizi (tornalama simülasyonları) Third Wave AdvantEdge® yazılımı kullanılarak incelenmiştir. Analizlerde sabit 1mm kesme derinliğinde 2B orthogonal kesme ve Lagrange yöntemleri kullanılmıştır. Kesme parametreleri üretici firma katalogları ve önceki çalışmalardan alınarak oluşturulmuştur. Belirlenen kesme parametreleri Tablo 3'te gösterilmektedir. Tüm deneyler için takım talaş açısı (γ) -6° , Boşluk açısı (α) 6° , Kenar yarıçapı (r) 0.02 uygulanmıştır. İş parçası ve kesici takım ağ yapısı, maksimum takım elemanı boyutu 0,1 mm, minimum takım elemanı boyutu 0,02 mm ve ağ 0,4 mm olarak modellenmiştir. Şekil 1'de oluşturulan kesme modeli görülmektedir.

Tablo 3. Kesme parametreleri ve seviye değerleri (Cutting parameters and level values)

Kesme parametreleri		Seviye		
		Düşük -1	Orta 0	Yüksek +1
Sıcaklık (°C)	T	30	300	600
Kesme Hızı (m/dk)	V	50	75	100
İlerleme Miktarı (mm/dev)	f	0.20	0.35	0.50



Şekil 1. Ortogonal işleme modeli (Orthogonal machining model)

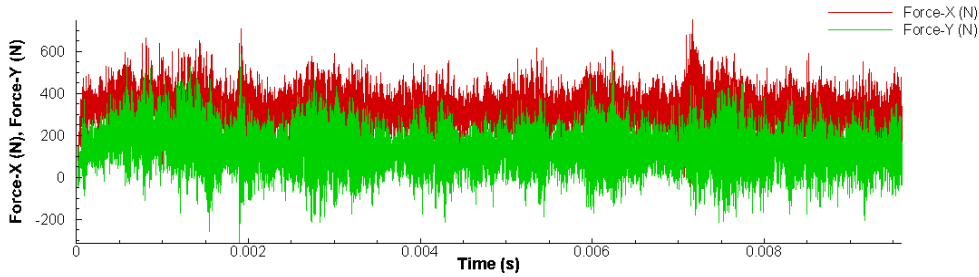
3. Bulgular ve Tartışma (Results and Discussion)

Bu bölümde analizler sonucunda elde edilen kesme kuvvetlerinin; Taguchi L9 ve ANOVA kullanılarak, etkin ve optimum kesme parametrelerinin belirlenmesine yer verilmiştir. Taguchi metodunda en iyi kesme kuvveti değeri için gerekli olan optimum kesme parametreleri için en küçük en iyi sinyal gürültü oranı denklemi kullanılmıştır. MINITAB 19 programında en küçük en iyi denklemi kullanılarak S/N oranları, seviye değerleri hesaplanmıştır. Bu denklemin sonucuna göre elde edilen S/N oranları Tablo 4'te verilmiştir.

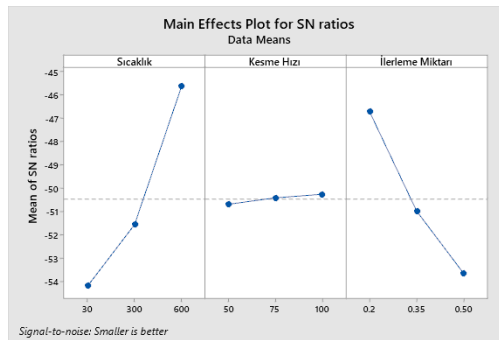
Tablo 4. Deney listesi ve analiz sonuçları (Experiment list and analysis results)

Deney No	Sıcaklık (°C)	Kesme Hızı (m/dk)	İlerleme Miktarı (mm/dev)	Kesme Kuvveti (N)	S/N
1	-1 (30)	-1 (50)	-1 (0.2)	336,4064	-50,5373
2	-1 (30)	0 (75)	0 (0.35)	546,5774	-54,753
3	-1 (30)	+1 (100)	+1 (0.50)	735,8981	-57,3364
4	0 (300)	-1 (50)	0 (0.35)	419,1479	-52,4473
5	0 (300)	0 (75)	+1 (0.50)	534,5212	-54,5593
6	0 (300)	+1 (100)	-1 (0.2)	242,3962	-47,6905
7	+1 (600)	-1 (50)	+1 (0.50)	285,7079	-49,1184
8	+1 (600)	0 (75)	-1 (0.2)	125,2875	-41,9582
9	+1 (600)	+1 (100)	0 (0.35)	194,5353	-45,78

AdvantEdge yazılımında yapılan analizler sonucunda elde edilen kesme kuvvetleri grafiği Şekil 2'de gösterilmektedir.

**Şekil 2.** Analizler sonucu elde edilen kesme kuvveti grafiği (The cutting force graph obtained as a result of the analysis.)

Analizler sonucunda elde edilen kesme kuvvetleri S/N oranının elde edilen yanıt grafikleri Şekil 3'de verilmektedir. Şekil 3 incelendiğinde kesme hızının S/N oranına etkisi sıcaklık ve ilerleme miktarına göre daha düşüktür. Buna ilaveten 300-600° aralığındaki etkinin 30-300° sıcaklık değişimine göre daha etkili olduğu gözlemlenmektedir. Benzer şekilde 0.2-0.35 mm/dev ilerleme hızı aralığındaki değişkenliğin yüksek devirdeki değişkenlikten daha büyük etkiye sahip olduğu gözlemlenmiştir. Kesme kuvvetleri açısından incelendiğinde optimum kesme sıcaklığının 600° kesme hızı 100 m/dk, ilerleme hızı 0,20 mm/dev olarak belirlenmiştir.

**Şekil 3.** En küçük en iyi S/N oranına göre proses parametrelerinin kesme kuvveti üzerine etkisi (Effect of process parameters on cutting force according to smallest best S/N ratio)

Elde edilen S/N oranının kesme kuvveti için tepki tablosu Tablo 5'te verilmiştir. Tablo kesme kuvveti açısından incelendiğinde en etkili parametrenin sıcaklık olduğu görülmektedir. Sıcaklığı sırasıyla ilerleme miktarı ve kesme hızı takip eder.

Tablo 5. Sinyal-gürültü oranları için yanıt tablosu (Response table for signal-to-noise ratios.)

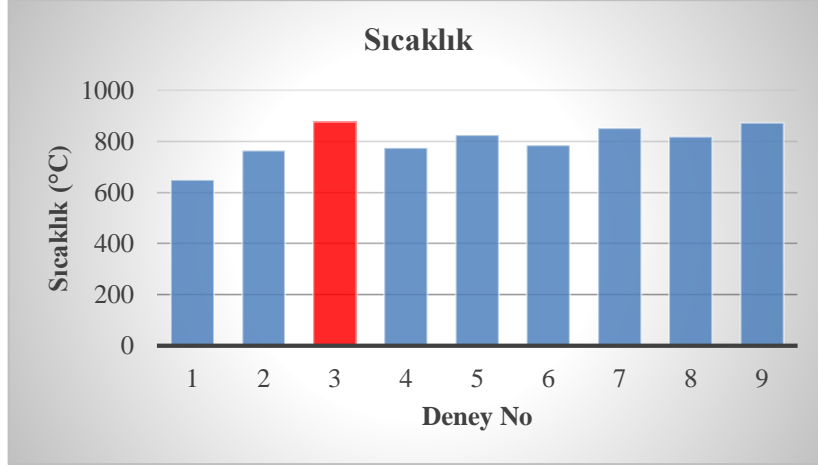
Seviye	Sıcaklık	Kesme Hızı	İlerleme Miktarı
1	-54,21	-50,70	-46,73
2	-51,57	-50,42	-50,99
3	-45,62	-50,27	-53,67
Delta	8,59	0,43	6,94
Rank	1	3	2

Yapılan simülasyonlar sonucu elde edilen ANOVA değerleri Tablo 6'da gösterilmektedir. Tablolardaki p değerlerinin <0,05 olması bu model için anlamlı olduğunu göstermektedir.

Tablo 6. Anova sonuçları (Anova results)

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	6	205,092	34,1820	30,29	0,032
Sıcaklık	2	122,813	61,4063	54,41	0,018
Kesme Hızı	2	0,651	0,3253	0,29	0,776
İlerleme Miktarı	2	81,629	40,8146	36,17	0,027
Error	2	2,257	1,1286		
Total	8	207,349			

Ayrıca analizler sonucunda tornalama işleminde elde edilen sıcaklıklar Şekil 4'de gösterilmektedir. Şekil incelendiğinde en yüksek sıcaklık değerinin 3 nolu deneyde elde edildiği görülmektedir.

**Şekil 4.** Sıcaklık sonuçları (Temperature results)

4. Sonuçlar (Results)

Bu çalışmada, Ti-6Al-4V'nin sıcak işlenmesinin kesme kuvvetlerinin değişimi sonlu elemanlar yöntemi ile araştırılmıştır. Analizler farklı kesme parametrelerine göre Taguchi L9 ortogonal deney listesine kullanılarak oluşturulmuştur. Kesme kuvveti değerlerinin doğrudan takım aşınması ve yüzey pürüzlülüğü ile doğrudan ilişkili olmasından dolayı en düşük kesme kuvvetinin hangi seviyede olduğu ve en etkili kesme parametresinin ne olduğu araştırılmıştır. Analizden, aşağıdaki sonuçlar listelenmiştir:

- İstatistiksel analizler sonucunda sıcak işlemede kesme kuvvetlerine etkiyen en etkili parametrenin sıcaklık değişimi olduğu, daha sonra ise sırasıyla ilerleme ve kesme hızı olduğu bulunmuştur.
- İlerleme hızının artması tüm sıcaklık koşullarında kesme kuvvetini artırmaktadır.
- Sıcak işleme uygulaması nedeniyle iş parçasının akış stresinin azalmasıdır. Bundan dolayı kesme mukavemetinde azalma meydana gelir.
- En düşük kesme kuvveti değeri 8 numaralı deneyde yani 75 m/dk kesme hızında, 0,2 mm/dev ilerleme miktarında ve 600°C sıcak işleme şartlarında gerçekleştirilen 8 numaralı deneyde 125,2875 N olarak ölçülmüştür.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the author.

Kaynaklar (References)

- Akasawa, T., Takeshita, H., & Uehara, K. (1987). Hot machining with cooled cutting tools. *CIRP Annals*, 36(1), 37-40.
- Alatrushi, L. K. H., Bedir, F., & Yılmaz, N. (2020). The Basic Concepts of Micro-Milling Process And Its Review in Terms of Distinctive Parameters. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 8(2), 643-654.
- Elkhateeb, M. G., & Shin, Y. C. (2019). Investigation of the machining behavior of Ti6Al4V/TiC composites during conventional and laser-assisted machining. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 141(5).
- Ginta, T. L., & Amin, A. N. (2013). Thermally-assisted end milling of titanium alloy Ti-6Al-4V using induction heating. *International Journal of Machining and Machinability of Materials*, 14(2), 194-212.
- Kalpakjian, S. (2001). *Manufacturing engineering and technology*: Pearson Education India.

- Karagüzel, U. (2019). Ti6Al4V Alaşımının Talaşlı İmalatı Sirasında Termal Kamera ile Sıcaklık Ölçümü ve Sonlu Elemanlarla Modellenmesi. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 7(2), 265-271.
- Leshock, C. E., Kim, J.-N., & Shin, Y. C. (2001). Plasma enhanced machining of Inconel 718: modeling of workpiece temperature with plasma heating and experimental results. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 41(6), 877-897.
- Luan, X., Meng, J., Huang, B., Dong, X., Hu, Y., Zhao, Y., . . . Qu, L. (2021). Machining characteristics of Ti6Al4V alloy in laser-assisted machining under minimum quantity lubricant. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 112(3), 775-785.
- Ma, J., Andrus, P., Condoor, S., & Lei, S. (2015). Numerical investigation of effects of cutting conditions and cooling schemes on tool performance in up milling of Ti-6Al-4V alloy. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 78(1-4), 361-383.
- Muhammad, R., Ahmed, N., Shariff, Y. M., & Silberschmidt, V. V. (2012). *Finite-element analysis of forces in drilling of Ti-alloys at elevated temperature*. Paper presented at the Solid State Phenomena.
- Pan, Z., Liang, S. Y., Garmestani, H., & Shih, D. S. (2016). Prediction of machining-induced phase transformation and grain growth of Ti-6Al-4 V alloy. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 87(1), 859-866.
- Parida, A., & Maity, K. (2016). *Finite element method and experimental investigation of hot turning of Inconel 718*. Paper presented at the Advanced Engineering Forum.
- Parida, A. K., & Maity, K. (2019). Hot machining of Ti-6Al-4V: FE analysis and experimental validation. *Sādhanā*, 44(6), 1-6.
- Rao, B., Dandekar, C. R., & Shin, Y. C. (2011). An experimental and numerical study on the face milling of Ti-6Al-4V alloy: Tool performance and surface integrity. *Journal of Materials Processing Technology*, 211(2), 294-304.
- Rashid, R. R., Bermingham, M., Sun, S., Wang, G., & Dargusch, M. (2013). The response of the high strength Ti-10V-2Fe-3Al beta titanium alloy to laser assisted cutting. *Precision Engineering*, 37(2), 461-472.
- Sahoo, A., Rout, A., & Das, D. (2015). Response surface and artificial neural network prediction model and optimization for surface roughness in machining. *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 6(2), 229-240.
- Shrot, A., & Bäker, M. (2012). Determination of Johnson-Cook parameters from machining simulations. *Computational Materials Science*, 52(1), 298-304.
- Smith, R. L., Schukken, Y. H., & Gröhn, Y. T. (2015). A new compartmental model of Mycobacterium avium subsp. paratuberculosis infection dynamics in cattle. *Preventive veterinary medicine*, 122(3), 298-305.
- Sofuoğlu, M. A., Çakır, F. H., Gürgen, S., Orak, S., & Kuşhan, M. C. (2018). Experimental investigation of machining characteristics and chatter stability for Hastelloy-X with ultrasonic and hot turning. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 95(1), 83-97.
- Sun, S., Brandt, M., Barnes, J., & Dargusch, M. (2011). Experimental investigation of cutting forces and tool wear during laser-assisted milling of Ti-6Al-4V alloy. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 225(9), 1512-1527.
- Ugur, L. (2019). 3D end milling of AISI 1040 finite element thermal analysis. *Journal of Engineering Research and Applied Science*, 8(2), 1286-1290.
- Uğur, L., & Kazan, H. (2020). Finite element modeling of power consumption in turning of AISI 1040 steel. *Journal of Engineering Research and Applied Science*, 9(2), 1597-1601.
- Ulutun, D., & Ozel, T. (2011). Machining induced surface integrity in titanium and nickel alloys: A review. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 51(3), 250-280.
- Upadhyay, V., Jain, P., & Mehta, N. (2013). *Machinability studies in hot machining of Ti-6Al-4V alloy*. Paper presented at the Advanced Materials Research.
- Zamani, H., Hermani, J. P., Sonderegger, B., & Sommitsch, C. (2012). *Numerical and experimental investigation of laser assisted side milling of Ti6Al4v alloy*. Paper presented at the Materials Science and Technology Conference and Exhibition 2012, MS and T 2012.