



Araştırma Makalesi/Research Article

Monel K-500 Alaşımının Isı Destekli İşlenmesi Üzerine Sayısal Bir Çalışma

Mahir Akgün^{ID*1}

¹Aksaray Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, 68100, Aksaray, Türkiye

Anahtar Kelimeler

Monel K-500
Isı destekli işleme
Kesme kuvveti
Sonlu elemanlar analizi

Makale geçmişi:

Geliş Tarihi: 26.01.2022
Kabul Tarihi: 18.04.2022

Öz: Bu çalışma, sonlu elemanlar analizi aracılığı ile Monel K-500 alaşımının sıcak işlenmesinde kesme kuvveti ve talaş oluşum sürecinin incelenmesini sunmaktadır. Sonlu elemanlar analizi için ThirdWave AdvantEdge yazılımı kullanılmıştır. Sayısal analizler için 300 m/dak kesme hızı (Vc), 0,1 mm/dev ilerleme miktarı (f) ve 1 mm talaş derinliği (a) kesme parametreleri olarak seçilmiştir. Sıcak işlemin etkisini belirleyebilmek için simülasyonlar oda sıcaklığı (24°C) ve dört farklı ısıtma sıcaklığında (150°C, 300°C, 450°C ve 600°C) gerçekleştirilmiştir. Nümerik analiz sonuçlarına göre oda sıcaklığı koşullarına kıyasla sıcak işleme koşullarında kesme kuvvetlerinin azaldığı ve oda sıcaklığı koşullarında talaş dilimli talaş şeklinde oluşur iken sıcak işleme koşullarında ise sürekli talaş şeklinde oluştuğu görülmüştür. En düşük kesme kuvveti değeri 600°C sıcak işleme şartında gerçekleştirilen sayısal analizlerde 315 N olarak ölçülmüştür. Dahası, kuru kesme şartına göre bu ısıtma sıcaklığında kesme kuvvetinin yaklaşık %34,14 azaldığı tespit edilmiştir.

Atıf için/To Cite:

Akgün M. Monel K-500 Alaşımının Isı Destekli İşlenmesi Üzerine Sayısal Bir Çalışma. Ulusallararası Teknolojik Bilimler Dergisi, 14(1), 23-29, 2022.

A Numerical Study on Heat-Assisted Machining of Monel K-500 Alloy

Keywords

Monel K-500
Heat-Assisted Machining
Cutting force
Finite element analysis

Article history:

Received: 26.01.2022
Accepted: 18.04.2022

Abstract: This study presents the investigation of the cutting force and chip formation process in hot machining of Monel K-500 alloy via finite element analysis. ThirdWave AdvantEdge software has been utilized for finite element analysis. For numerical analysis, cutting speed of 300 m/min, feed rate of 0.1 mm/rev, and 1 mm depth of cut have been selected as cutting parameters. Cutting simulations have been performed at room temperature (24°C) and four different heating temperatures (150°C, 300°C, 450°C, and 600°C) to determine the effect of hot processing. According to the results of the numerical analysis, it was observed that the cutting forces decreased in hot machining conditions compared to room temperature conditions, and the chip formed in the form of segmented chips in room temperature conditions, while it was formed as continuous type chips in hot machining conditions. The lowest cutting force value was measured as 315 N in numerical analyzes performed at 300 m/min cutting speed, 0.1 mm/rev feed rate, 1 mm depth of cut, and 600°C hot machining conditions. Moreover, it was determined that the cutting force decreased by approximately 34.14% at this heating temperature compared to the dry cutting condition.

1. Giriş

Sıcak işleme ya da ısı destekli işleme kesilmesi zor metallerin ve alaşımların işlenmesinde kullanılan çevre dostu bir tekniktir. Sıcak işlemedeki temel prensip bir ısı kaynağı kullanılarak iş parçası malzemesinin kesme mukavemetini azaltmaktır [1]. Buna bağlı olarak, bileşen kuvvetlerini azaltarak daha uzun takım

ömrünün elde edilmesi ve yüzey kalitesinin iyileşmesi amaçlanmaktadır.

Sıcak işlemede; plazma ısı desteği, lazerle ısı desteği, indüksiyon ve alevle ısıtma gibi farklı ısıtma teknikleri kullanılmaktadır [2-5]. Her yöntemin kendine göre avantajları ve dezavantajları vardır. Sıcak işleme teknikleri genellikle tornalama ve frezeleme işlemlerinde kullanılmaktadır [6]. Tüm yöntemler

* ilgili yazar/Corresponding author: mahirakgun@aksaray.edu.tr

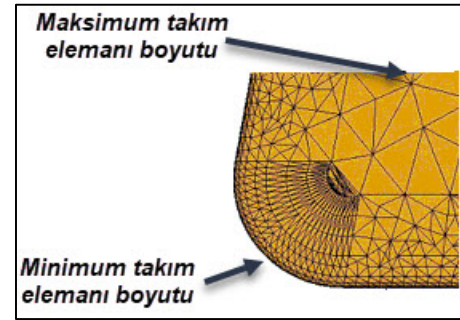
arasında alevle ısıtma, basit tasarımı ve düşük maliyeti ile lazer ısıtma ise hem kesme hem de işleme için uygunluğu ile dikkat çekmektedir. Örneğin, alev ısıtma kullanılarak Inconel 625 alaşımının 30°C, 300°C ve 600°C'de sıcak işlendiği bir çalışmada, en yüksek takım ömrünün 600°C'de elde edildiği görülmektedir [7]. Başka bir çalışmada ise minimum miktarda yağlama şartlarında Ti6Al4V alaşımının lazer destekli işlenmesinde, geleneksel işlemeye göre takım aşınmasının %49,1 yüzey pürüzlülüğünün ise %33,7 azaldığı vurgulanmıştır [8]. Buna ek olarak, farklı bir çalışmada da Inconel 718 alaşımının lazer destekli işlenmesinde geleneksel işleme ile karşılaştırıldığında kesme kuvvetlerinin yaklaşık olarak %37,3 oranında azaldığını tespit etmişlerdir [9].

Son yıllarda, talaşlı imalat, haddeleme, dövme ve ekstrüzyon gibi plastik şekillendirme uygulamalarında sonlu elemanlar analizi kullanımının arttığı görülmektedir. Özellikle, talaş imalat alanında kesilmesi zor malzemelerin işleme prosesinin sayısal modellemesi ve analizi üzerine yoğunlaşılması dikkat çekmektedir. Stres, gerinim, kesme sıcaklığı, talaş morfolojisi ve kesme kuvvetleri gibi işlenebilirliğe konu olan önemli hususlar sonlu elemanlar analizi aracılığıyla deney seti oluşturmadan değerlendirile bilinmektedir. Ayrıca, sıcak işleme, kriyojenik işleme ve ultrasonik işleme gibi yeni yöntemlerin simülasyonu da yapılabilmektedir. Bu yeni kesme yöntemlerinin mekaniğini anlamak için sonlu elemanlar analizi kullanılarak yapılan literatürde birçok çalışma vardır [10-13]. Örneğin, Parida ve Maity Inconel 718 alaşımının sıcak işlenmesinde talaş oluşumunu Deform 3D programını kullanarak incelemişlerdir [14]. Rotella ve Umbrello AA7075-T651 alaşımının kuru ve kriyojenik işlenmesinde kesme kuvvetlerinin ve yüzey modifikasyonunun simülasyonu üzerine çalışmışlardır [15]. Amini ve arkadaşları, MSC-Marc yazılımında Inconel 718 alaşımının ultrasonik destekli tormalanmasında takım titreşimi üzerine bir çalışma gerçekleştirmişlerdir [16]. Parida ve Maity Ti-5553 alaşımının sıcak işlenmesinde kesme kuvvetlerini, takım aşınmasını, kesme sıcaklığı bakımından işlenebilirliğini deneysel ve nümerik olarak araştırmışlardır [17]. Kaynak ve arkadaşları, Ti-5553 alaşımının kriyojenik, minimum miktarda yağlama (MQL), ve yüksek basınçlı kesme şartlarında ortogonal kesiminde talaş oluşumunu deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir [18]. Yalçın ve arkadaşları, farklı kesme şartlarında sertleştirilmiş AISI H13 sıcak iş takım çeliğinin sert tormalanmasında kesici takımda meydana gelen stresleri deneysel ve sonlu elemanlar analizi ile incelemişlerdir [19]. Özlü ve Uğur, ThirdWave AdvantEdge yazılımında Ti6Al4V alaşımının farklı kesme şartlarında tormalanmasında oluşan kesme kuvvetinin optimizasyonuna çalışmışlardır [20].

Literatürdeki çalışmalar dikkate alındığında mühendislik malzemelerinin işlenmesinde inovatif yöntemlerin deneysel ve sayısal olarak uygulanması üzerine birçok çalışmanın olduğu görülmektedir. Ancak, nikel esaslı bir süper alaşım olan Monel K-500 alaşımının sıcak işlenmesi üzerine çalışmaların çok az olduğu görülmüştür. Sunulan çalışmada kesme kuvveti, kesme sıcaklığı ve talaş oluşumu bakımından Monel K-500 alaşımının sıcak işlenebilirliğinin sayısal olarak değerlendirilmesi amaçlanmıştır.

2. Materyal ve Yöntem

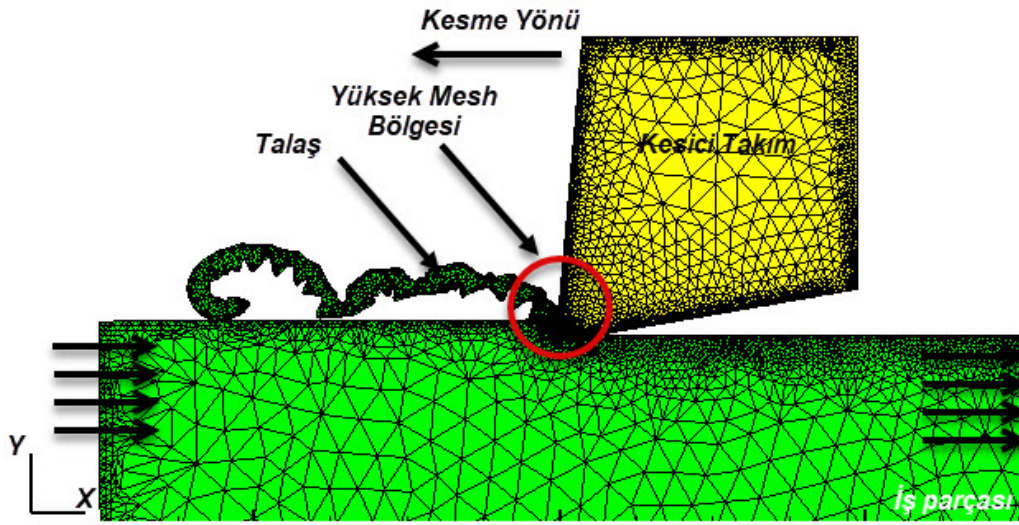
Bu çalışmada sıcak işleme modeli ThirdWave AdvantEdge yazılımının iki boyutlu işleme modülü kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Modelleme süreci dört aşamadan oluşmaktadır. İlk olarak, iş parçası malzemesi olarak programın malzeme kütüphanesinde yer alan Monel K-500 alaşımı seçilmiştir. İş parçası malzeme yapısal parametreleri, fiziksel ve mekanik özellikleri (ısı ve elastik özellikleri gibi) programda Monel K-500 alaşımı yer aldığı için direkt kullanılmıştır. Analiz süresini azaltmak için iş parçası malzemesi 8 mm boyunda ve 4 mm kalınlığında tanımlanmıştır.



Şekil 1. Kesici takım için ağ yapısı

Gerekli olan diğer bir aşamada kesici takım geometrisi ve özelliklerinin tanımlanmasıdır. Kesici takım malzemesi tungsten karbür (WC) olarak tanımlanmıştır. İki boyutlu işleme modeli için kesici takım talaş açısı 5°, boşluk açısı 10° ve kenar yarıçapı 0,2 mm olarak tanımlanmıştır. 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.

Son olarak, iş parçası ve kesici takım özellikleri tanımlandıktan sonra kesme şartları tanımlanmıştır. Kesme şartları Tablo 1'de verilmiştir. Bu kesme şartlarında gerçekleştirilen sayısal analizlerde kesme kuvveti ve talaş oluşumu dikkate alınmıştır. Şekil 2'de ortogonal işleme modeli görülmektedir



Şekil 2. Ortogonal işleme modeli

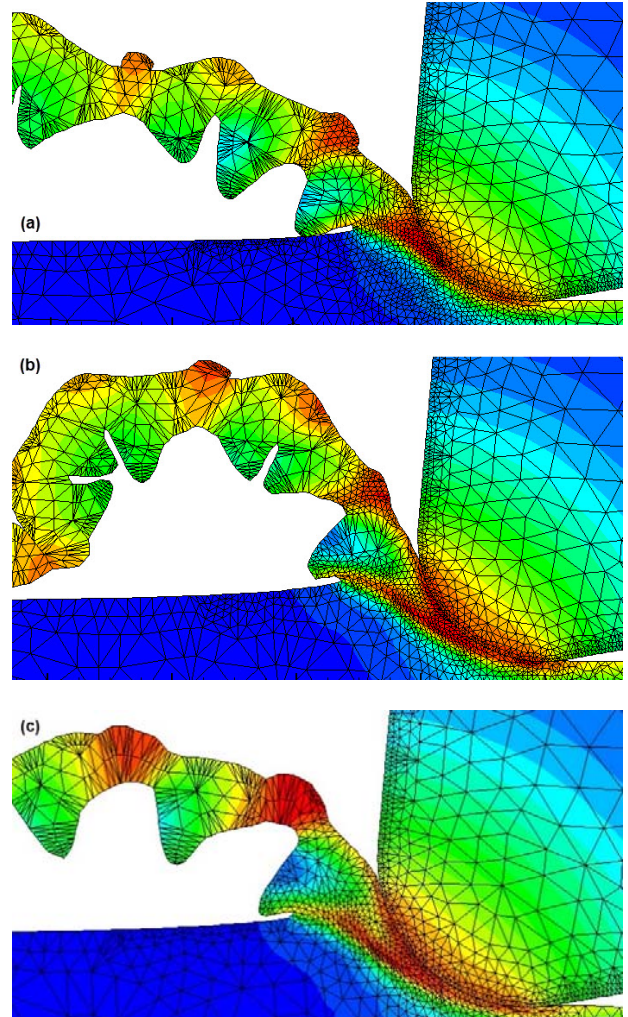
Tablo 1. İşleme şartları
Seviye

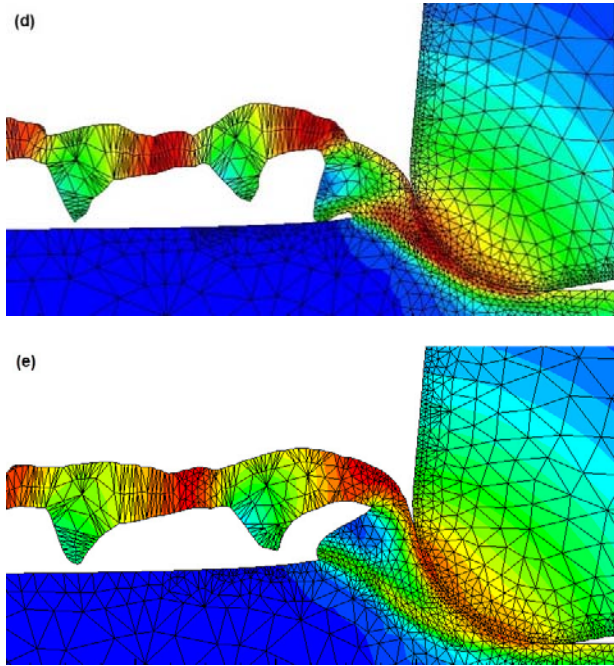
Parametreleri	Seviye				
	I	II	III	IV	V
Sıcaklık (°C)	24	150	300	450	600
Kesme hızı (m/dak)	300	-	-	-	-
İlerleme miktarı (mm/dev)	0,1	-	-	-	-
Talaş derinliği (mm)	1	-	-	-	-

3. Sonuçlar ve Tartışma

3.1. Sıcak İşlemenin Talaş Oluşumuna Etkisi

Şekil 3'de Monel K-500 alaşımının oda sıcaklığında (20°C) ve farklı sıcaklıklarda (150°C, 300°C 450°C ve 600°C) işlenmesi sonucu elde edilen talaş oluşumu görülmektedir. Şekil 3(a)'ya bakıldığında, oda sıcaklığında gerçekleştirilen sonlu elemanlar analizi sonucunda talaş şeklinin kalın ve dilimli (testere formu) olduğu görülmektedir. Isıl iletkenliği düşük malzemelerin işlenmesinde bu tip talaş oluşumu beklenen bir durumdur [21, 22]. Talaşın testere formunda oluşması kesme kuvvetlerinin düzensizliğinin bir göstergesidir ve yüzey kalitesi bu durumdan olumsuz etkilenmektedir. Sıcak işlemede ise oda sıcaklığında işlemeye kıyasla talaşın daha ince ve sürekli talaş şeklinde olduğu ve testere tırtıklılığının yoğunluğunu azaldığı görülmektedir. Ayrıca, bütün işleme şartlarında talaş oluşumu üzerinde ısı destekli işlemenin etkisini irdelemek için nümerik analizlerde talaş kalınlığı ölçümü yapılmıştır.





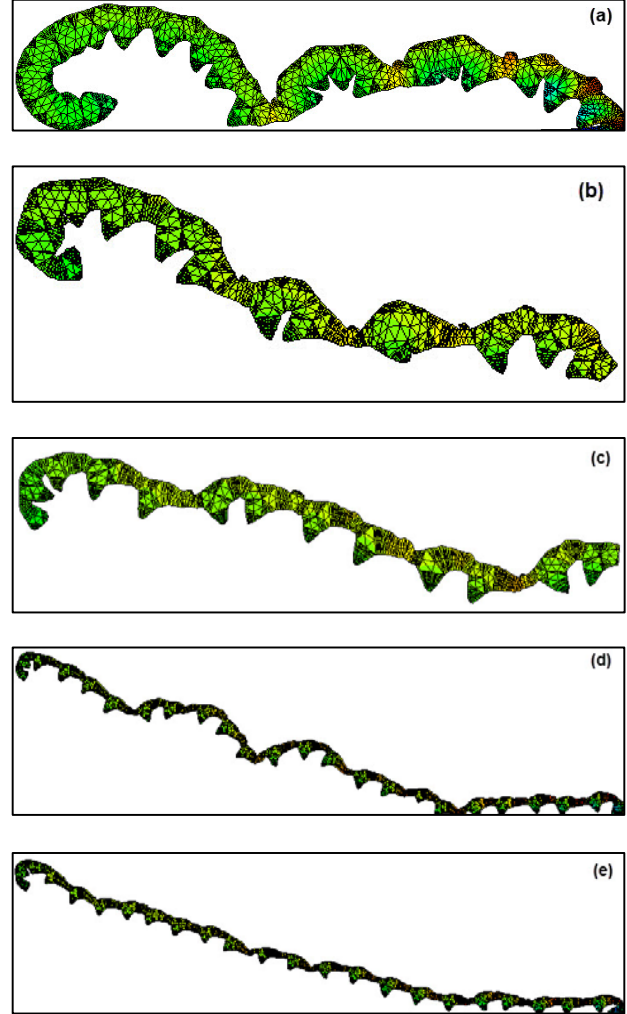
Şekil 3. Talaş oluşumu: a) oda sıcaklığı, b) 150°C c) 300°C d) 450°C e) 600°C

Oda sıcaklığında ve 150°C, 300°C, 450°C ve 600°C işleme şartlarında talaş kalınlığı sırasıyla 177 µm, 165 µm, 156 µm, 148 µm ve 130 µm olarak ölçülmüştür. Bu sonuca göre ısıtma sıcaklığının artmasıyla talaş kalınlığının azaldığı tespit edilmiştir. Şekil 4'de oda sıcaklığında ve farklı sıcaklıklarda işleme simülasyonu sonrası elde edilen talaş tipleri yer almaktadır. Şekil 3'e bakıldığında, oda sıcaklığında işlemeye göre sıcak işleme şartlarında ince sürekli talaş oluştuğu görülmektedir. Buna bağlı olarak, simülasyondan iş parçasının yüzey kalitesinin önemli ölçüde iyileştiği sonucuna varılabilir. Parida ve Maity, Inconel 718, Inconel 625 ve Monel 400 süper alaşımlarının sıcak tornalama yöntemi işlenmesinde kesme kuvveti, takım ömrü, talaş morfolojisi, takım aşınması ve yüzey bütünlüğü bakımından bu alaşımların kesme performanslarını değerlendirmişlerdir. Sonuç olarak, ısı destekli işleme şartlarında (600°C) Inconel 718, Inconel 625 ve Monel 400 alaşımlarının yüzey pürüzlülüklerinin sırasıyla %23, %42 ve %50 azaldığını bildirmişlerdir [23]. Lajis ve arkadaşları, sertleştirilmiş AISI D2 çeliğini frezeleme yöntemi ile sıcak (300°C ve 600°C) işledikleri çalışmalarında, oda sıcaklığında işlemeye göre sıcak işleme şartlarında işlenmiş yüzeyin mikrosertliğinin bir miktar azaldığını ve bu durumu ısı desteği ile gerinim sertleşmesinin azalması ile açıklamışlardır [24].

3.2. Isı Destekli İşlemenin Kesme Kuvvetlerine Etkisi

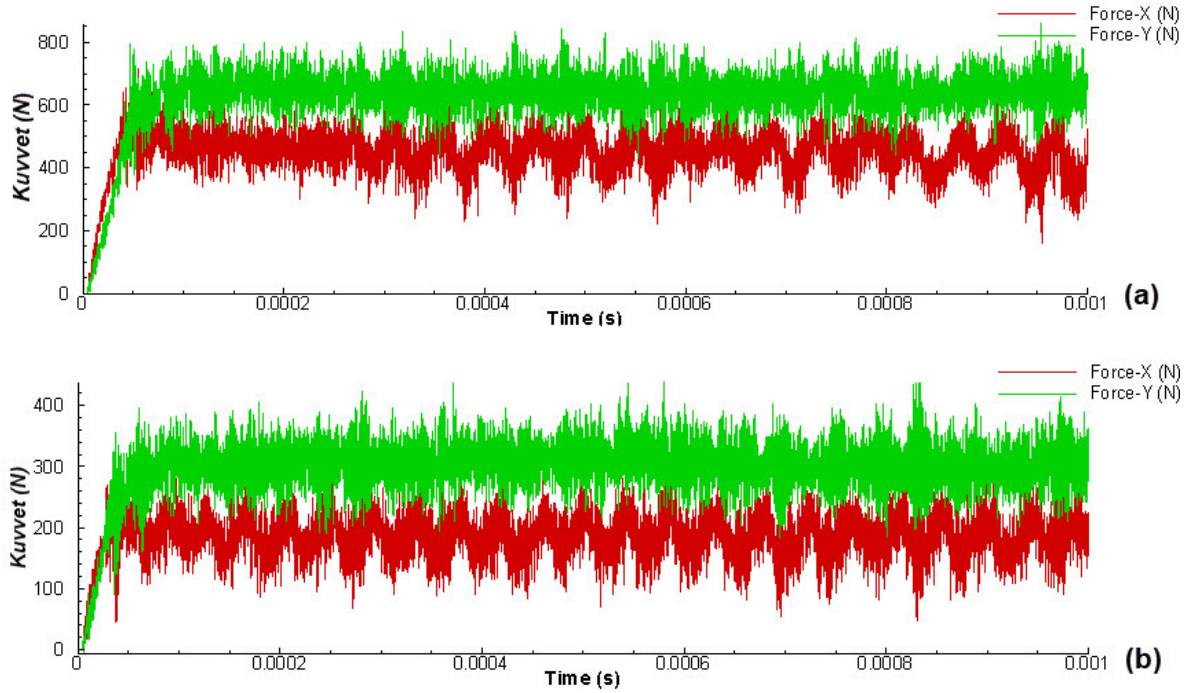
Talaşlı imalat işlemlerinde enerji tüketimi açısından birincil düzeyde önemli olan esas kesme kuvveti (F_c)

değerleri dikkate alınmıştır. Şekil 5 kesme kuvvetleri için AdvantEdge yazılımından alınan simülasyon sonucunun grafik örneklerini göstermektedir. Kesme kuvvetleri belirli bir mesafenin ortalama değeri alınarak Şekil 5'ten elde edilmiştir [25]. Sıcak işlemenin etkisinin daha iyi anlaşılabilmesi için kesme parametreleri sabit tutulmuştur.

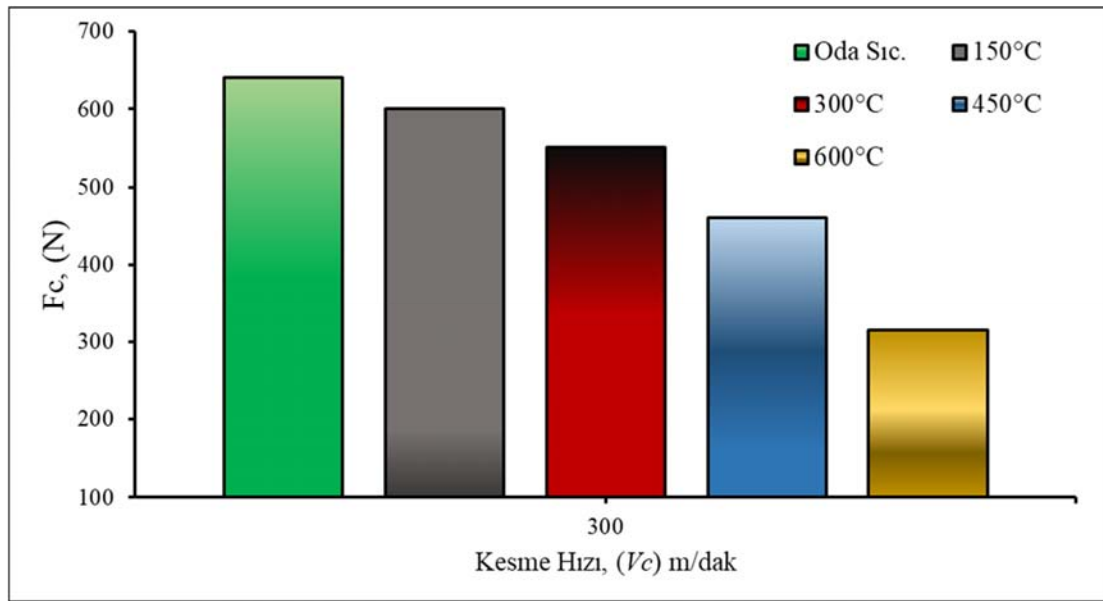


Şekil 4. Talaş tipleri: a) oda sıcaklığı, b) 150°C c) 300°C d) 450°C e) 600°C

Şekil 6'de 300 m/dak kesme hızında, 0,1 mm/dev ilerleme miktarında, 1 mm talaş derinliğinde oda sıcaklığında (20°C) ve farklı sıcaklıklarda (150°C, 300°C 450°C ve 600°C) gerçekleştirilen nümerik analizler sonucu elde edilen kesme kuvvetlerinin değişimi görülmektedir. Şekil 6'ya bakıldığında işleme sıcaklığının artırılması ile kesme kuvvetlerinin azalış eğiliminde olduğu görülmektedir. Oda sıcaklığındaki işlemeye göre 150°C, 300°C, 450°C ve 600°C işlemede sırasıyla %6,66 %14,06 %28,12 ve %50,78 oranlarında kesme kuvvetinin azaldığı tespit edilmiştir. Bu durum iş parçasına ısı uygulanması ile iş parçası malzemesinin



Şekil 5. Simülasyon sonucunun grafiksel gösterimi a) oda sıcaklığı, b) 600°C.



Şekil 6. Kesme kuvvetinin değişimi: a) oda sıcaklığı, b) 150°C c) 300°C d) 450°C e) 600°C

kesme mukavemetinin azalması ile uygulanan dinamik streslerin azalması ile açıklanabilir. Thandra ve Choudhury deneysel olarak gerçekleştirdikleri çalışmalarında konvansiyonel işlemeye göre sıcak işleme ile kesme kuvvetlerini yaklaşık %34 oranında azaldığını bildirmişlerdir [26]. Dahası, Parida ve Maity de Inconel 718 süper alaşımının sıcak işlenmesini deneysel ve nümerik olarak kıyasladıkları çalışmalarında, oda sıcaklığı koşullarına kıyasla 600 °C'lik ısıtma sıcaklığındaki kesme ve itme kuvvetinin yaklaşık %34,14 arasında azaldığını

bildirmişlerdir [27]. Elde edilen sonuçlar literatür ile paralel olup nümerik modelleme sonuçlarının geçerli olduğunu göstermektedir.

5. Sonuçlar

Bu çalışma, Monel K-500 alaşımının sıcak işlenmesinin kesme kuvveti ve talaş oluşumu bakımından sonlu elemanlar analizi ile araştırılmasına odaklanmaktadır. Monel K-500 alaşımının işlenebilirlik performansı, oda sıcaklığında ve dört farklı ısıtma sıcaklığında (150°C,

300°C, 450°C ve 600°C) değerlendirilmiştir. Bu çalışmadan elde edilen bazı önemli sonuçlar şu şekilde sıralanabilir;

- Oda sıcaklığında gerçekleştirilen sayısal analizlerde talaş dilimli oluşur iken 150°C, 300°C, 450°C ve 600°C'de sıcak işleme şartlarında gerçekleştirilen sayısal analizlerde sürekli talaş oluşmuştur.
- Oda sıcaklığında işleme koşullarına kıyasla sıcak işleme şartlarında talaş kalınlığı azalmıştır.
- Oda sıcaklığında işleme koşullarına kıyasla 150°C, 300°C, 450°C ve 600°C sıcak işleme şartlarında sırasıyla %6,66 %14,06 %28,12 ve %50,78 oranlarında kesme kuvvetinin azaldığı tespit edilmiştir.
- En düşük kesme kuvveti değeri 300 m/dak (Vc), 0,1 mm/dev (f), 1 mm (a) ve 600°C sıcak işleme şartlarında gerçekleştirilen sayısal analizlerde 315 N olarak ölçülmüştür.

Kaynaklar

- [1] Nurul Amin AKM, Ginta TL. Heat-Assisted Machining. *Comprehensive Materials Processing*, 11, 297-331, 2014.
- [2] Özler L, Inan Theoretical A, Özel C. and experimental determination of tool life in hot machining of austenitic manganese steel. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 41(2), 163-172, 2001.
- [3] Sun S, Brandt M, Dargusch MS. Thermally enhanced machining of hard-to-machine materials—A review. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 50(8), 663-680, 2010.
- [4] Novak JW, Shin YC, Incropera FP. Assessment of Plasma Enhanced Machining for Improved Machinability of Inconel 718. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 119(1), 125-129, 1997.
- [5] Kizaki T, Harada K, Mitsuishi M. Efficient and precise cutting of zirconia ceramics using heated cutting tool. *CIRP Ann.*, 63(1), 105-108, 2014.
- [6] Sofuoğlu MA, Çakır FH, Gürgeç S, Orak S, Kuşhan MC. 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, 2018.
- [7] Parida AK, Maity K. FEM analysis and experimental investigation of force and chip formation on hot turning of Inconel 625. *Defence Technology*, 15(6), 853-860, 2019.
- [8] Luan X, Meng J, Huang B, Dong X, Hu Y, Zhao Y, Qu L. Machining characteristics of Ti6Al4V alloy in laser-assisted machining under minimum quantity lubricant. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 112(3), 775-785, 2021.
- [9] Jeong HI, Lee CM. A study on improvement of tool life using a heat shield in laser assisted machining to Inconel 718. *Optics & Laser Technology*, 142, 107208, 2021.
- [10] Mitrofanov AV, Babitsky VA, Silberschmidt VV. Finite element simulations of ultrasonically assisted turning. *Computational materials science*, 28(3-4), 645-653, 2003.
- [11] Cakir FH, Gurgeç S, Sofuoğlu MA, Celik ON, Kushan MC. Finite element modeling of ultrasonic assisted turning of Ti6Al4V alloy. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 195, 2839-2848, 2015.
- [12] Pandey K, Datta S. Hot machining of difficult-to-cut materials: A review. *Materials Today: Proceedings*, 44, 2710-2715, 2021.
- [13] Xu W, Liu X, Sun J, Zhang L. Finite element simulation and experimental research on electric hot machining. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 66(1-4), 407-415, 2013.
- [14] Parida AK, Maity K. Numerical analysis of chip geometry on hot machining of nickel base alloy. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 40(10), 1-9, 2018.
- [15] Rotella G, Umbrello D. Numerical simulation of surface modification in dry and cryogenic machining of AA7075 alloy. *Procedia Cirp*, 13, 327-332, 2014.
- [16] Amini S, Soleimanimehr H, Nategh MJ, Abudollah A, Sadeghi MH. FEM analysis of ultrasonic-vibration-assisted turning and the vibratory tool. *Journal of materials processing technology*, 201(1-3), 43-47, 2008.
- [17] Parida AK, Maity K. Analysis of some critical aspects in hot machining of Ti-5553 superalloy: experimental and FE analysis. *Defence Technology*, 15(3), 344-352, 2019.
- [18] Kaynak Y, Gharibi A, Ozkutuk M. Experimental and numerical study of chip formation in orthogonal cutting of Ti-5553 alloy: the influence of cryogenic, MQL, and high pressure coolant supply. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 94(1), 1411-1428, 2018.
- [19] Yalcin B, Yilmaz N, Kurt A. Tool Stresses in Soft and Hard Finish Turning with Low Content CBN Tool by Finite Elements Analysis. *Acta Physica Polonica, A.*, 134(1), 48-56, 2018.
- [20] Özlü B, Uğur L. Optimization of cutting forces on turning of Ti-6Al-4V Alloy by 3D FEM

- simulation analysis. *Journal of Engineering Research and Applied Science*, 10(2), 1789-1795, 2021.
- [21] Trent EM, *Metal Cutting*, Butterworths Pres, London, 1989.
- [22] Akkuş H, Yaka H. Experimental and statistical investigation of the effect of cutting parameters on surface roughness, vibration and energy consumption in machining of titanium 6Al-4V ELI (grade 5) alloy. *Measurement*, 167, 108465, 2021.
- [23] Parida AK, Maity K. Comparison the machinability of Inconel 718, Inconel 625 and Monel 400 in hot turning operation. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 21(3), 364-370, 2018.
- [24] Lajis MA, Amin AKM, Karim AN. Surface integrity in hot machining of AISI D2 hardened steel. *In Advanced Materials Research*. 500, 44-50, 2012.
- [25] Korkmaz ME, Günay M. Finite Element Modelling of Cutting Forces and Power Consumption in Turning of AISI 420 Martensitic Stainless Steel. *Arabian Journal for Science & Engineering*, 43(9), 4863-4870, 2018.
- [26] Thandra SK, Choudhury SK. Effect of cutting parameters on cutting force, surface finish and tool wear in hot machining. *International Journal of Machining and Machinability of Materials*, 7(3-4), 260-273, 2010.
- [27] Parida AK, Maity K. Effect of nose radius on forces, and process parameters in hot machining of Inconel 718 using finite element analysis. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 20(2), 687-693, 2017.