

AISI 329 Dupleks Paslanmaz Çeliğin Frezelenmesinde Farklı Sürfaktan Katkılı CuO Nanoakışkanların Performans Değerlendirmesi

İbrahim DEMİR¹ , Turgay KIVAK¹ , Şenol ŞİRİN^{2,*} 

¹ Düzce Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Düzce, Türkiye

² Düzce Üniversitesi, Gümüşova Meslek Yüksekokulu, Düzce, Türkiye

MAKALE BİLGİSİ

Alınma: 26.06.2022

Kabul: 29.07.2022

Anahtar Kelimeler:

AISI 329

Sürfaktan

Frezeleme

MMY

ÖZET

Nanoakışkanlar metal işleme sektöründe, işleme performansına son derece olumlu katkılar sunmaktadır. Son yıllarda özellikle nanoakışkanlar üzerine çalışmalar yoğunlaşmakla birlikte raf ömrü ve homojenliği bir merak konusudur. Homojen bir nanoakışkan elde etme ve karışımın raf ömrünü artırma adına farklı yüzey aktif maddeler (surfaktanlar) karışıma eklenebilmektedir. Bu çalışmada, CuO nanopartikül katkılı bitkisel esaslı yağın içerisinde farklı oranlarda cetiltrimetilamonyum bromid (CTAB), polivinilpolipirrolidon (PVP) ve sodyum dodesil sülfat (SDS) eklenerek nanoakışkan karışımlar hazırlanmıştır. Aynı oranlarda eklenen surfaktanların işleme performansı üzerindeki etkilerinin belirlenmesi adına AISI 329 dupleks paslanmaz çelik malzemeye bir dizi frezeleme deneyi uygulanmıştır. Deneyler Taguchi L9 deney seti kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Deneylerde girdi parametresi olarak üç farklı surfaktan (CTAB, PVP ve SDS), kesme hızı (120, 160 ve 200 m/dak), ilerleme (0.10-0.15 ve 0.20 mm/dev) seçilmiştir. Performans kriteri olarak yüzey pürüzlülüğü (Ra), kesme sıcaklığı (T) ve takım aşınması tercih edilmiştir. Faktörlere ait etki düzeylerinin belirlenmesinde varyans analizi (ANOVA) kullanılmıştır. Deneylerden elde edilen sonuçlara göre; PVP surfaktan katkılı CuO nanoakışkanın Ra, kesme sıcaklığı ve takım aşınmasında en iyi performansı gösterdiği anlaşılmıştır.

Performance Evaluation of CuO Nanofluids with Different Surfactants in the Milling of AISI 329 Duplex Stainless Steel

ARTICLE INFO

Received: 26.06.2022

Accepted: 29.07.2022

Keywords:

AISI 329

Surfactant

Milling

MQL

ABSTRACT

Nanofluids offer extremely positive contributions to the machining performance in the metalworking industry. Although studies on nanofluids have been intensified in recent years, shelf-life and homogeneity are a matter of curiosity. Different surface agents (surfactants) can be added to the mixture in order to obtain a homogeneous nanofluid and increase the shelf-life of the mixture. In this study, nanofluid mixtures were prepared by adding cetyltrimethylammonium bromide (CTAB), polyvinylpyrrolidone (PVP) and sodium dodecyl sulphate (SDS) at different rates into CuO nanoparticle added vegetable based oil. A series of milling experiments were applied to AISI 329 duplex stainless steel material to determine the effects of surfactants added in the same proportions on the machining performance. Experiments were carried out using the Taguchi L9 experimental set. Three different surfactants (CTAB, PVP, and SDS), cutting speed (120, 160, and 200 m/min), feed (0.10, 0.15, and 0.20 mm/rev) were selected as input parameters in the experiments. Surface roughness (Ra), cutting temperature (T) and tool wear were preferred as machining performance criteria. Analysis of variance (ANOVA) was used to determine the effect levels of the factors. According to the results obtained from the experiments; it was determined that PVP surfactant-added CuO nanofluid showed best performance in surface quality, cutting temperature and tool wear according to other surfactants.

*Sorumlu yazar, e-posta: senolsirin@duzce.edu.tr

To cite this article: İ. Demir, T. Kivak, Ş. Şirin, Performance Evaluation of CuO Nanofluids with Different Surfactants in the Milling of AISI 329 Duplex Stainless Steel, Manufacturing Technologies and Applications, 3(2), 9-21, 2022.

<https://doi.org/10.52795/mateca.1135978>, This paper is licensed under a [CC BY-NC 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Paslanmaz çelikler gündelik yaşamda karşımıza çıkan ve gıda sektöründen kimyasal sektöre kadar geniş bir çerçevede kullanım potansiyeline sahip malzemelerdir. Paslanmaz çelikleri östenitik, ferritik, ferritik-östenitik, çökeltme sertleşmeli ve dubleks olmak üzere beş başlık altında toplayabiliriz [1]. Yapılarında yüksek oranda krom (Cr, %20~30) ve nikel (Ni, %5~10) barındıran dubleks paslanmaz çelikler aynı zamanda ferritik-östenitik paslanmaz çelik olarak da adlandırılırlar. Dubleks paslanmaz çelik grubunda bulunan AISI 329 (Dubleks 1.4460, SS2324, UNS S32900) östenitik ve ferritik paslanmaz çeliklere (AISI 304, 316 vb.) göre daha fazla korozyona karşı dayanıklıdırlar [2]. Yüksek sertlik ve iyi korozyon direnci kombinasyonu nedeniyle AISI 329 dubleks paslanmaz çelikleri; korozyon, çukurluk, aralık korozyonuna karşı yüksek direnç, iyi kaynak yapılabirlik, yüksek mekanik mukavemeti, tasarım avantajları sunmaktadır. Tüm bu avantajlarının yanında AISI 329 düşük ısı iletkenlik ve kesici kenarında yığılma talaş oluşumu gibi dezavantajları yüzünden şekillendirilmesi zor malzeme olarak da bilinirler [3]. Özellikle frezeleme gibi darbeli şekillendirme proseslerinde işleme verimliliğini artırmak için işleme koşullarının çok iyi seçilmesi gerekmektedir [4].

Frezelemede işleme verimliliğini artırmanın en bilinen yöntemi metal işleme sıvılarının kullanılmasıdır [5]. Ancak sürdürülebilir imalat sürecinde ekolojik kaygılar yüzünden petrol bazlı metal işleme sıvılarının kullanımının azaltılması veya tamamen kullanımının sonlanması çalışmaları hız kazanmıştır [6]. Hem işleme verimliliğini artırma hem de zararlı petrol bazlı metal işleme sıvılarının etkisini azaltma adına son yıllarda minimum miktarda yağlama (MMY) sıkça duyulmaya başlanmıştır [7]. MMY yöntemi ile sistemde bulunan yağ (genellikle bitkisel esaslı yağ) basınçlı hava ile aerosol sis buharı oluşturmaktadır [8,9]. Bir nozul vasıtasıyla ise kesme bölgesine tatbik edilmektedir [10]. Ancak MMY işleme performansı açısından metal kesme sıvılarının gerisinde kalmaktadır. Bu durumu geliştirmeye çalışan araştırmacılar MMY sistemindeki yağa hacimce veya ağırlıkça tribolojik performansı yüksek farklı şekillere sahip (küresel, yassı, lamel, silindirik vb.) katı haldeki nanopartiküller (genelde >100 nm) eklemektedir [6]. Hazırlanan bu nanoakışkanlar hem performans olarak metal işleme sıvılarının önüne geçmekte hem de toksik olmamaları yüzünden kullanılabilirlik sunmaktadırlar. Ne var ki tüm bu üstün performansları yüzünden kullanımı yaygınlaşmaya başlasa da raf ömürlerinin kısa olması yüzünden dezavantajlı olabilmektedirler [11]. Kolloidal karışım olan nanoakışkanlarda nanopartiküller sıvı içerisinde askıda durmaktadırlar [12]. Zamanla çökeltme veya topaklanma gibi olumsuz koşullar meydana geldiğinden işleme esnasında da dezavantaj oluşturabilmektedirler. Homojen bir karışım oluşturma adına nanoakışkan karışımlara farklı özellikli yüzey aktif maddeleri (surfaktan) eklenebilmektedir [13]. Literatürde surfaktanların nanoakışkan karışımlara eklendiği çok sayıda çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmaların bazılarına aşağıda değinilmiştir.

Şirin vd. yaptıkları çalışmada Hastelloy X süperalaşım malzemeye karbür matkaplarla delme operasyonu uygulamışlardır. Çalışmada hBN ve grafen katkılı nanoakışkanlara Gum Arabik (GA) ve Sodyum Dodesil Sülfat (SDS) surfaktanlarını ekleyerek delme performanslarını incelenmiştir. hBN+SDS karışımının kuru, MMY, hBN, grafen, grafen+SDS, grafen+GA ve hBN+GA nanoakışkan karışımlara göre daha iyi performans gösterdiği iddia edilmiştir [13]. Geetha vd. AISI 4340 malzemeyi kuru, MMY, Triton X100 surfaktan katkılı Cu, grafen ve Cu + grafen koşulları altında kaplamasız karbür takımlarla tornalamıştır. Çalışma sonunda araştırmacılar grafen nanoakışkanının daha iyi performans gösterdiğini ifade etmişlerdir [14]. Eltaggaz vd. Ti6Al4V malzemeyi ağırlıkça %0.2 ve %0.4 Al₂O₃ katkılı nanoakışkan koşulları altında tornalamışlardır. Nanoakışkan hazırlarken araştırmacılar SDS surfaktanı ekleyerek karışımı stabil hale getirmişlerdir. Çalışmada nanopartikül konsantrasyon oranının artmasının takım ömrünü ve yüzey kalitesi kalitesini olumlu yönde etkilediğini belirtmişlerdir [15]. Musavi vd. A286 süperalaşım malzemeyi kaplamalı sementid karbür takımlarla tornalamıştır. Tornalama işlemi; ıslak, MMY, SiO₂, CuO nanoakışkan koşullarında, hacimce farklı CuO nanoakışkan koşulları (hacimce %0, %0.1, %0.4, %0.7 ve %1) ve SDS surfaktan katkılı CuO nanoakışkan koşullarında gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçlarından elde edilen veriler ışığında araştırmacılar, CuO nanoakışkanının diğer koşullara göre

üstün performans gösterdiğini ve SDS surfaktan katkısı eklenmesiyle yüzey pürüzlülük değerlerinde azalma görüldüğünü iddia etmişlerdir [16].

Literatür değerlendirildiğinde, nanoakışkanların işleme performansı üzerinde olumlu sonuçlar verdiği ifade edilmiştir. Ayrıca nanoakışkanların homojen dağılım sergileyerek, topaklanma ve çökme gibi sorunların önlenmesinde surfaktanlar kullanılmaktadır. Literatür araştırmasında her ne kadar nanoakışkan karışımların işlenebilirlik performansları incelense de AISI 329 dubleks paslanmaz çeliğin frezelenmesinde farklı surfaktan katkıları içeren nanoakışkan karışımların performans değerlendirilmesinin henüz yapılmadığı anlaşılmaktadır. Yapılan bu çalışma ile farklı surfaktan (CTAB, PVP ve SDS) katkılı CuO nanoakışkan karışımların AISI 329 dubleks paslanmaz çeliğin frezeleme operasyonu sırasında tribolojik performans üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu kapsamda Taguchi L9 deney tasarımı kullanılarak yüzey pürüzlülüğü ve kesme sıcaklığının optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Ayrıca ANOVA analizi yapılarak kontrol faktörlerin etki düzeyleri tespit edilmeye çalışılmıştır. Son olarak farklı surfaktan koşulların kesici takım ömründeki değişimleri incelenmiştir.

2. MATERYAL VE YÖNTEM (MATERIAL AND METHOD)

2.1. İş parçası, Takım ve Tutucu (Workpiece, Cutting Tool and Holder)

Bu çalışmada, herhangi bir fiziksel veya kimyasal işlem (ısıtma işlemi vb.) uygulanmamış ticari halde $100 \times 150 \times 16$ mm ölçülerinde AISI 329 dubleks paslanmaz çeliği (1.4460, SS2324, UNS S32900) kullanılmıştır. Üretici firmadan alınan bilgiler doğrultusunda AISI 329 dubleks paslanmaz çeliğine ait kimyasal bileşim ve mekanik özellikleri sırasıyla Tablo 1 ve Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 1. AISI 329 dubleks paslanmaz çelik kimyasal bileşimi (Chemical composition of AISI 329 duplex stainless steel)

Element (% ağırlıkça)							
C	Mn	Si	Cr	Ni	P	S	Mo
0.10	2	1	25-30	3-6	0.045	0.03	1-2

Tablo 2. AISI 329 dubleks paslanmaz çelik mekanik özellikleri (Mechanical specification of AISI 329 duplex stainless steel)

Yoğunluk	Poisson Oranı	Elastikiyet Modülü	Gerilme Direnci	Akma Dayanımı	Uzama
(kg/m ³)		(GPa)	(MPa)	(MPa)	(%)
7.8	0.27-0.30	1920-210	724	550	25

Frezeleme deneylerinde PVD AlTiCrN kaplamalı 1130 kalite Sandvik 490R-08T308M karbür takımlar kullanılmıştır. Kesici takımlar 25 mm süpürme çapında, Sandvik 490-025A20-08L takım tutucuya rijit bir şekilde bağlanmıştır.

2.2. Nanoakışkan Karışımlar ve Karışım Prosesi (Nanofluids and Preparation of Mixtures)

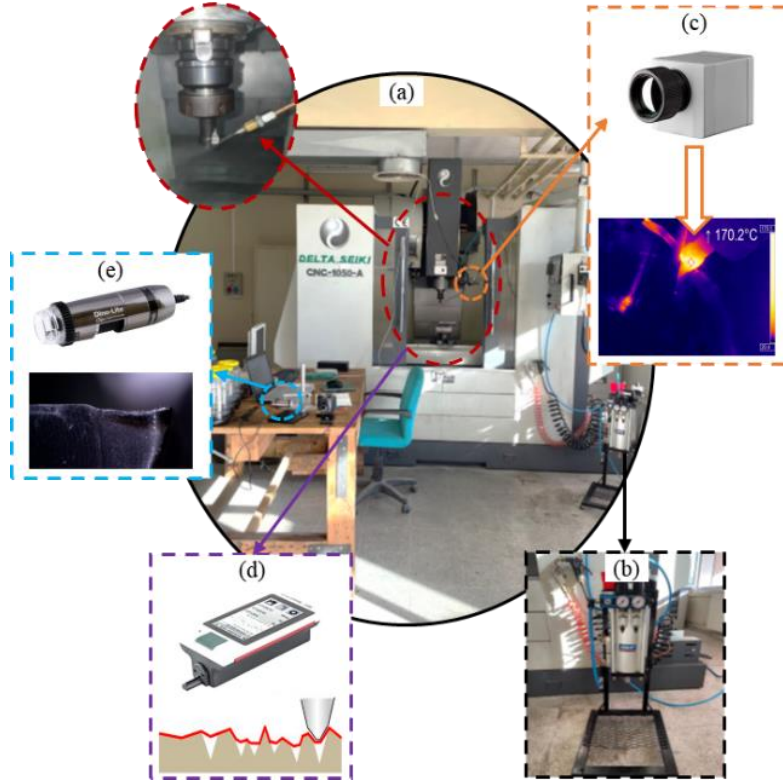
Nanoakışkan karışımların hazırlanmasında baz sıvı olarak Opet Fuchs PlantoCut SR10 bitkisel esaslı yağ kullanılmıştır. Nanopartikül olarak bakır oksit (CuO) kullanılmıştır. Nanopartiküle ait özellikler Tablo 3’te verilmiştir. Nanoakışkan karışımlar için ilk aşamada bitkisel esaslı yağ içerisine hacimce %0.6 oranında CuO nanopartikül ve nanopartikül ağırlığının %0.25 oranında (CTAB, PVP ve SDS) surfaktan eklenmiştir. İkinci aşamada Daihan HS100D mekanik bir karıştırıcıyla 60 dakika karıştırılmıştır. Üçüncü aşamada 20 kHz frekansında 200 W maksimum gücünde Bandelin marka HD 3200 ultrasonik homojenizatörde karışıma devam edilmiştir. Dördüncü ve son aşamada ise Termal N11151M manyetik karıştırıcıyla 2 saat karıştırılarak nanoakışkan karışımlar elde edilmiştir.

Tablo 3. CuO nanopartikül özellikleri (Kaynak; Üretici) (Specifications of CuO nanoparticle (Source: manufacturer))

Saflık	Renk	Biçim	Boyut	Özgül Yüzey Alanı	Kitle Yoğunluğu	Gerçek Yoğunluk
%99.99	Siyah	Kürelese Yakın	38 nm	>20 m ² /gr	0.8 gr/cm ³	6.5 gr/cm ³

2.3. Takım Tezgahı ve Deneysel Ölçümler (Machine Tool and Experimental Measurements)

Frezeleme deneyleri Delta Seiki CNC 1050-A dik işleme merkezinde (Şekil 1-a) gerçekleştirilmiştir.



Şekil 1. Deney düzeneği; a) CNC dik işleme merkezi, b) MMY cihazı, c) Termal kamera, d) Pürüzlülük ölçüm cihazı, e) Dijital mikroskop (Experimental setup: a) CNC vertical machine, b) MQL device, c) Thermal camera, d) Roughness measurement instrument, e) Digital microscope)

Nanopartikül ve surfaktan ağırlıkların ölçülmesinde KERN PCB hassas terazi kullanılmıştır. Hazırlanan nanoakışkan karışımların kesme bölgesine tatbik edilmesinde SKF Vario MMY sistemi kullanılmıştır (Şekil 1-b). Tüm deneylerde 8 bar basınç ve 75 mL/saat debi sabit alınmıştır. Kesme bölgesine nanoakışkanlar 2 mm çapında bir nozul ile gönderilmiştir. Nozul kesici takım üst bölgesine 20 mm mesafede konumlandırılmıştır. Deneyler esnasında kesme bölgesindeki azami sıcaklığın tespit edilmesinde termografik görüntüleme yapan Optris PI 450 kızılötesi termal kamera kullanılmıştır (Şekil 1-c). Termal kamera talaşlardan etkilenmeyecek şekilde kesme bölgesine 300 mm mesafede ve 45 derece açıda konumlandırılmıştır. Frezelenen yüzeylerin yüzey pürüzlülük değerlerinin ölçülmesinde taşınabilir Mahr Marsurf PS10 pürüzlülük ölçüm cihazı kullanılmıştır (Şekil 1-d). Yüzey pürüzlülük ölçümleri ISO 4287 standardına göre gerçekleştirilmiş olup aritmetik yüzey pürüzlülük değerleri (Ra) dikkate alınmıştır. Her yüzey pürüzlülük ölçüm öncesinde taşınabilir pürüzlülük ölçer doğrulama blok yardımıyla kalibre edilmiştir. Ölçümler işlenen yüzeylerin farklı bölgelerinden alınan üç ölçümün aritmetik ortalaması alınarak tespit edilmiştir. Deneyler sonrası aşınan kesici takımların ölçüm ve görüntüleme işlemlerinde, Dino Lite AM791MZT dijital mikroskop kullanılmıştır (Şekil 1-e).

2.4. Deneysel Tasarım ve Optimizasyon (Experimental Design and Optimization)

Metal işlemede zamandan ve maliyetten tasarruf sağlama adına farklı optimizasyon yöntemleri yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. En bilinen optimizasyon yöntemlerinden biri de Taguchi yöntemidir. Bu çalışmada da zaman ve maliyetten tasarruf sağlanması adına yüzey pürüzlülük ve kesme sıcaklığının optimizasyonunda Taguchi yöntemi tercih edilmiştir. Taguchi L9 deney tasarımının kullanıldığı çalışmada deney faktörleri ve parametreleri Tablo 4’te verilmiştir. Deney tasarımında üç farklı surfaktan katkılı (CTAB, PVP ve SDS) CuO nanoakışkanı, üç farklı kesme hızı (120, 160 ve 200 m/dak), üç farklı ilerleme (0.10, 0.15 ve 0.20 mm/dev) kontrol faktörü olarak kullanılmıştır. Deney parametreleri ön deney sonuçlarından elde edilen veriler ve takım firmasının tavsiyesi dikkate alınarak belirlenmiştir. Kesme derinliği (0.5 mm) ve radyal kesme derinliği (15 mm) tüm deneylerde sabit alınmıştır. Deneylerden elde edilen sonuçların değerlendirilmesi ve grafik çiziminde Minitab paket programı kullanılmıştır.

Tablo 4. Deneysel tasarım ve kontrol faktörleri (Experimental design and control factors)

Kontrol Faktörleri	Sembol	Birim	Seviyeler		
			1	2	3
Nanoakışkan karışımlar	A	(<i>Surfaktan</i>)	CTAB	PVP	SDS
Kesme Hızı (Vc)	B	(<i>m/dak</i>)	120	160	200
İlerleme (f)	C	(<i>mm/dev</i>)	0.10	0.15	0.20

Taguchi yönteminde “en büyük en iyi”, “nominal iyi” ve “en küçük en iyi” yaklaşımları bulunmaktadır. Yüzey pürüzlülük Ra değerlerinin ve kesme sıcaklığı değerlerinin düşük olması arzu edildiğinden bu çalışmada Taguchi “en küçük iyi” yaklaşımı tercih edilmiştir. En küçük en iyi fonksiyonu Eş.1’de verilmiştir.

$$\eta = S / N_s = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (1)$$

Eş. 1’de “n” deney sayısını, “y” ise gözlemlenen verileri ifade etmektedir.

3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

3.1. Yüzey Pürüzlülük Ra Sonuçları (Surface Roughness Ra Results)

Gerçekleştirilen frezeleme deneyleri sonrası elde edilen Ra değerleri ve sinyal/gürültü (SN) değerleri Tablo 5’te verilmiştir.

Tablo 5. Ra değerleri ve SN oranları (Ra values and SN ratios)

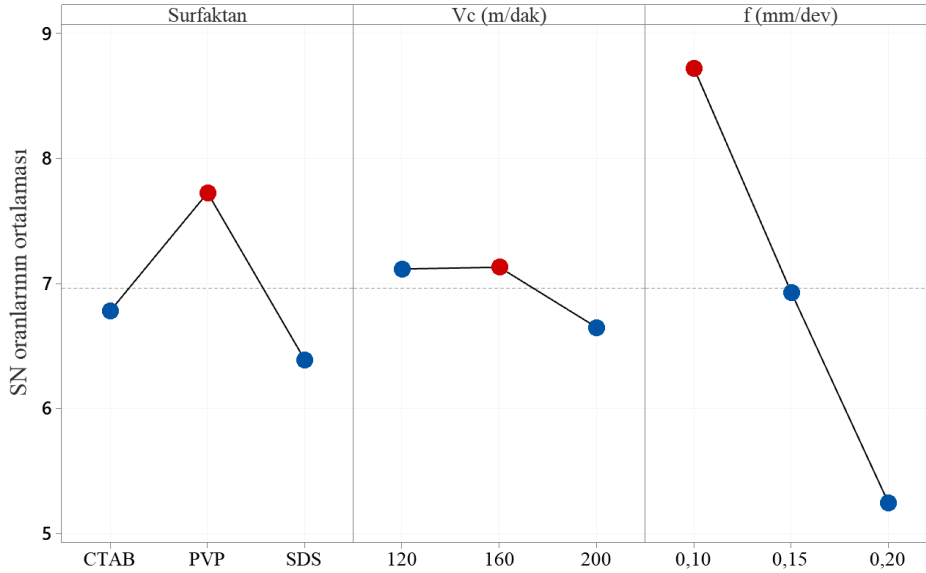
No	A Surfaktan	B (Vc, m/dak)	C (f, mm/dev)	(Ra) (μm)	SN (dB)
1	CTAB	120	0.10	0.386	8.26825
2	CTAB	160	0.15	0.437	7.19037
3	CTAB	200	0.20	0.570	4.88250
4	PVP	120	0.15	0.399	7.98054
5	PVP	160	0.20	0.516	5.74701
6	PVP	200	0.10	0.337	9.44740
7	SDS	120	0.20	0.556	5.09850
8	SDS	160	0.10	0.378	8.45016
9	SDS	200	0.15	0.524	5.561337

Tablo 5’te yer alan veriler yardımıyla, Ra değerlerinin aritmetik ortalaması 0.456 μm ve SN değerlerinin aritmetik ortalaması 6.95845 dB şeklinde hesaplanmıştır. Gerçekleştirilen analizler ışığında Ra değerlerinin SN yanıt sonuçları Tablo 6’da verilmiştir.

Tablo 6. Ra değerlerinin SN yanıt sonuçları (SN response results of Ra values)

Seviyeler	Kontrol Faktörleri		
	Nanoakışkanlar (Sürfaktan)	Kesme Hızı (Vc - m/dak)	İlerleme (f - mm/dev)
	A	B	C
1	0.4643	0.4470	0.3670
2	0.4173	0.4437	0.4533
3	0.4860	0.4770	0.5473
Delta	0.0687	0.0333	0.1803

Tablo 6’da verilen koyu kırmızı değerler kontrol faktörlerinin optimum parametrelerini ifade etmektedir. Ra değerleri için SN etki grafiği Şekil 2’de verilmiştir.

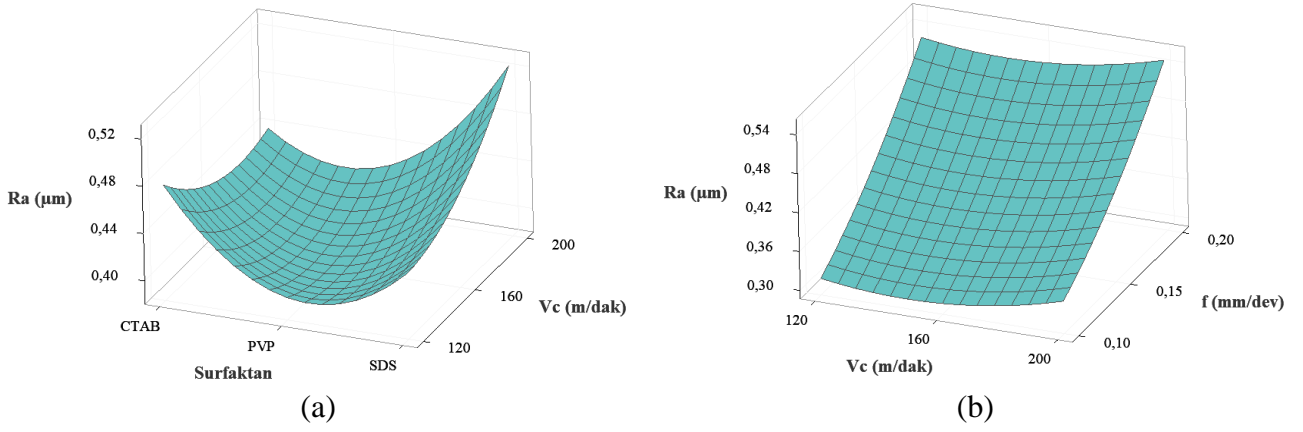


Sinyal-gürültü: Daha küçük daha iyidir

Şekil 2. Ra değerleri için SN etki grafiği (SN effect plot for Ra values)

Tablo 6 ve Şekil 2 değerlendirildiğinde optimum kesme koşulunun A2B2C1 olduğu anlaşılmaktadır. Bir başka deyişle AISI 329 dubleks paslanmaz çeliğin işlenmesinde PVP surfaktan katkılı nanoakışkanın, 160 m/dak kesme hızının ve 0.10 mm/dev ilerlemenin en uygun kesme koşulu olduğu ifade edilebilir. Sürfaktan katkılı nanoakışkan, kesme hızı ve ilerlemeye bağlı Ra değişimleri Şekil 3’te verilmiştir.

Şekil 3 incelendiğinde en düşük Ra değerlerine PVP surfaktan katkılı CuO nanoakışkan koşulunda elde edildiği bunu sırasıyla CTAB ve SDS surfaktan katkılı nanoakışkanların takip ettiği anlaşılmaktadır. Literatürde yapılan çalışmalarda PVP surfaktan katkılı nanoakışkanların daha iyi stabilite performansı gösterdiği ifade edilmiştir [17]. Benzer şekilde bu çalışmada, diğer surfaktanlara göre hem stabilite hem de tribolojik olarak üstün özellik gösterdiği düşünülen PVP surfaktanın daha iyi performans sergilediği yorumu yapılabilir. Ra üzerine en etkili parametrenin ilerleme değeri olduğu bilinmektedir [18]. İlerlemenin artmasıyla kesici takım yarıçapının oluşturduğu izler artmakta bunun sonucunda ise yüzey pürüzlülük değerleri de artış göstermektedir. Bu durumu Tablo 7 ANOVA tablosu doğrular niteliktedir.



Şekil 3. Elde edilen Ra değişimleri; a) Surfactant-kesme hızı değişimi, b) Kesme hızı-ilerleme değişimi (Ra values; a) Surfactant-cutting speed variation, b) Cutting speed-feed variation)

Tablo 7. Ra değerleri için ANOVA yanıt tablosu (ANOVA response table for Ra values)

Kaynak	DF	Seq SS	Katkı (%)	Adj SS	Adj MS	F-Değeri	P-Değeri
Surfaktan	2	0.007394	12.33	0.007394	0.003697	4.23	0.191
Vc (m/dak)	2	0.002022	3.37	0.002022	0.001011	1.16	0.464
f (mm/dev)	2	0.048810	81.38	0.048810	0.024405	27.90	0.035
Hata	2	0.001750	2.92	0.001750	0.000875		
Toplam	8	0.059975	100				

Ra değerlerine ait ANOVA yanıt tablosu (Tablo 7) incelendiğinde, Ra üzerine en etkili parametrenin %81,38 oranı ile ilerleme olduğu anlaşılmaktadır. Ra üzerine etki eden diğer önemli parametreler ise %12,33 oran ile surfaktan ve %3,37 oran ile kesme hızı olmuştur. Hata değeri %2,92 olarak düşük mertebelerde gerçekleşmiştir.

3.2. Kesme Sıcaklığı Sonuçları (Cutting Temperature Results)

Talaş kaldırma operasyonlarında kesici takım iş parçası ile sürekli temas halinde olduğundan sürtünmenin de etkisiyle kesme bölgesinde ısı artışı meydana getirmektedir. Kesme bölgesinde yükselen sıcaklık değerlerinin özellikle kesici takım aşınması üzerine olumsuz etkileri bulunmaktadır [19]. Bu yüzden kesme bölgesinde bulunan sıcaklığın kontrol altına alınması son derece önem arz etmektedir. Frezeleme operasyonu esnasında gerçek zamanlı kayıt altına alınan değerlerle elde edilen kesme sıcaklığı değerleri (T) Tablo 8’de verilmiştir.

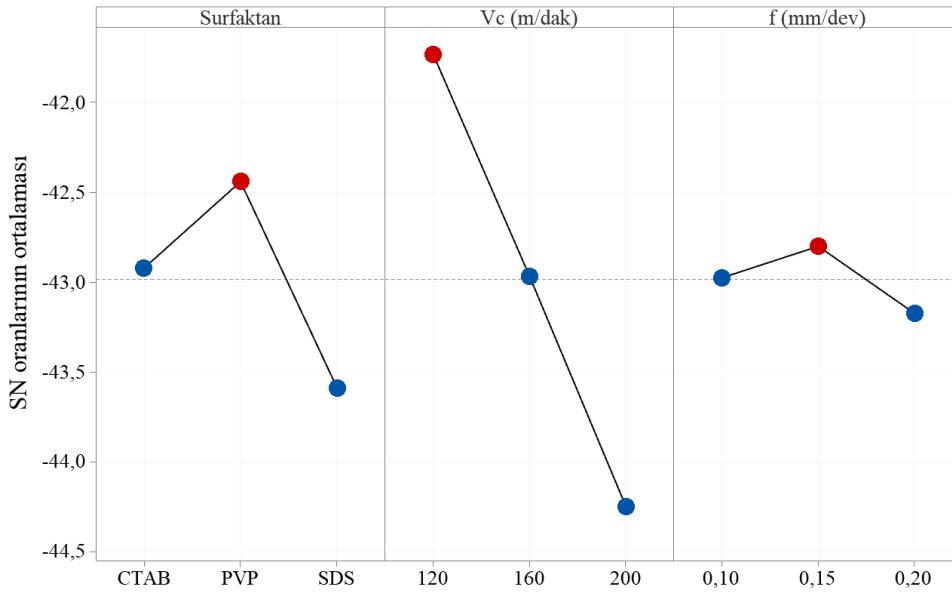
Tablo 8. Kesme sıcaklığı T değerleri ve SN oranları (Cutting temperature T values and SN ratios)

No	A Surfaktan	B (Vc, m/dak)	C (f, mm/dev)	T (°C)	SN (dB)
1	CTAB	120	0.10	121	-41.6557
2	CTAB	160	0.15	135	-42.6067
3	CTAB	200	0.20	168	-44.5062
4	PVP	120	0.15	114	-41.1381
5	PVP	160	0.20	135	-42.6067
6	PVP	200	0.10	151	-43.5795
7	SDS	120	0.20	132	-42.4115
8	SDS	160	0.10	153	-43.6938
9	SDS	200	0.15	171	-44.6599

Tablo 8 kesme sıcaklığı sonuçlarından yararlanılarak, T değerlerinin ve S/N değerlerinin aritmetik ortalaması sırasıyla 142.2 °C ve -429.842 dB olarak hesaplanmıştır. Analiz programı yardımıyla elde edilen T sonuçlarının S/N yanıt sonuçları ise Tablo 9’da verilmiştir.

Tablo 9. Kesme sıcaklığı T değerlerinin SN yanıt sonuçları (SN response results of cutting temperature T values)

Seviyeler	Kontrol Faktörleri		
	Nanoakışkanlar (Sürfaktan)	Kesme Hızı (Vc - m/dak)	İlerleme (f - mm/dev)
	A	B	C
1	141.3	122.3	141.7
2	133.3	141.0	140.0
3	152.0	163.3	145.0
Delta	18.7	41.0	5.0

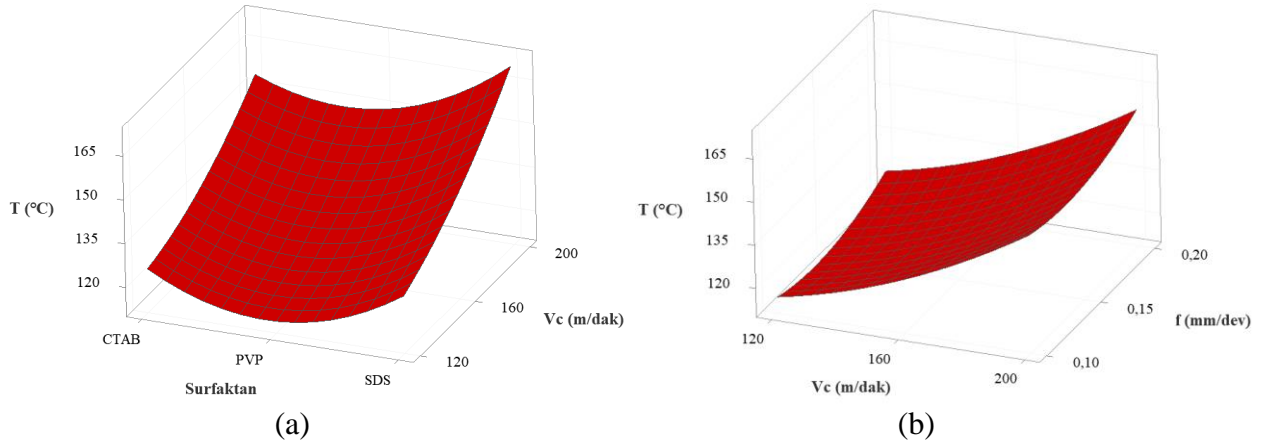


Sinyal-gürültü: Daha küçük daha iyidir

Şekil 4. Kesme sıcaklığı T değerleri için SN etki grafiği (SN effect plot for cutting temperature T values)

Şekil 4 grafiklerden ve Tablo 9’daki değerlerden faydalanılarak kesme sıcaklığı T için optimum koşulların A2B1C2 olduğu ifade edilebilir. Bu deneysel çalışmada, kesme sıcaklığı için PVP surfaktanı, 120 m/dak kesme hızı ve 0.15 mm/dev ilerleme optimum koşullardır, sonucuna varılmıştır. Farklı koşullar ve parametrelerde kesme bölgesinde gözlemlenen maksimum sıcaklık değerlerinden elde edilen grafikler Şekil 5’te verilmiştir.

Şekil 5 kesme sıcaklığı grafikleri incelendiğinde en düşük kesme sıcaklığının PVP surfaktan katkılı CuO nanoakışkanında elde edildiği anlaşılmaktadır. Bunu sırasıyla CTAB ve SDS surfaktan katkılı CuO nanoakışkanları takip etmiştir. Ra sonuçlarında olduğu gibi kesme sıcaklığı T sonuçlarında PVP surfaktan katkılı CuO nanoakışkanı daha iyi performans göstermiştir. Bu noktadan hareketle, PVP surfaktanın diğer surfaktanlara göre nispeten homojen dağılım göstermesi, kesme bölgesinde yağlayıcı tribo film tabakasının daha iyi nüfuz etmesini sağlamıştır yorumu yapılabilir. Şekil 5-b incelendiğinde kesme sıcaklığının artışına en fazla kesme hızının etki ettiği anlaşılmaktadır. Kesme hızı değerlerinin artmasıyla kesme sıcaklığı değerleri, ilerlemeye göre daha fazla artış göstermiştir. Kesme sıcaklığı ANOVA tablosu (Tablo 10) da bu durumu doğrulamaktadır.



Şekil 5. Elde edilen kesme sıcaklığı T değişimleri; a) Sürfaktan-kesme hızı değişimi, b) Kesme hızı-ilerleme değişimi (Cutting temperature T variations; a) Surfactant-cutting speed variation, b) Cutting speed-feed variation)

Tablo 10. Kesme sıcaklığı T değerleri için ANOVA yanıt tablosu (ANOVA response table for cutting temperature T values)

Kaynak	DF	Seq SS	Katkı (%)	Adj SS	Adj MS	F-Değeri	P-Değeri
Surfaktan	2	526.22	16.75	526.22	263.11	10.91	0.084
V_c (m/dak)	2	2528.22	80.48	2528.22	1264.11	52.43	0.019
f (mm/dev)	2	38.89	1.24	38.89	19.44	0.81	0.554
Hata	2	48.22	1.53	48.22	24.11		
Toplam	8	3141.56	100				

Tablo 10 ANOVA yanıt tablosu incelendiğinde kesme sıcaklığı T üzerinde %80.48 oranla en fazla kesme hızının etkili olduğu anlaşılmaktadır. Bunu %16.75 oranla surfaktan koşulları ve %1.24 oranla ilerleme takip etmiştir. ANOVA analizi sonucunda ise hata oranı sadece %1.53 düzeylerinde kalmıştır.

3.3. Doğrulama Deneyi Sonuçları (Validation Experiment Results)

Deneylerden elde edilen sonuçlara göre yüzey pürüzlülük R_a ve kesme sıcaklığı T için optimum parametreler sırasıyla A2B2C1 ve A2B1C2 olarak hesaplanmıştır. Taguchi ile elde edilen optimizasyon sonuçları bazen deney setinin içinde çıkarken bazen de farklı bir parametre olarak çıkabilmektedir. Bu çalışmada optimum parametreler R_a için deney setinin dışında çıkarken T için deney setinin içinde çıkmıştır. Optimum parametrelerin belirlenmesinde R_a için Eş.2'den T için Eş.3'ten faydalanılmaktadır.

$$R_{a_{optimum}} = (A2 - T_{Ra}) + (B2 - T_{Ra}) + (C1 - T_{Ra}) + T_{Ra} \quad (2)$$

$$T_{optimum} = (A2 - T_T) + (B1 - T_T) + (C2 - T_T) + T_T \quad (3)$$

Eş.2 ve Eş.3'te A2B2C1 ve A2B1C2 R_a ve T için optimum koşulları, T_{Ra} ve T_T ise Tablo 5 ve Tablo 8'de yer alan R_a ve T değerlerinin aritmetik ortalamasını ifade etmektedir. Değerler denklemlerde yerlerine konulduğunda, $R_{a_{optimum}}$ 0.316 μm , $T_{optimum}$ 111.2 °C olarak hesaplanmıştır.

Taguchi ile elde edilen optimum değerlerin ardından gerçekleştirilen doğrulama deneyleri sonucunda elde edilen değerler, optimizasyon sonuç aralığında olmalıdır. Elde edilen optimum değerler ve doğrulama değerleri sonuçlarının değerlendirilmesinde Eş.4 ve Eş.5 kullanılmaktadır.

$$CI = \sqrt{F_{\alpha;1;f_e} \times V_e \times \left(\frac{1}{n_{eff}} + \frac{1}{r} \right)} \quad (4)$$

$$n_{eff} = \frac{N}{1 + [T_{dof}]} \quad (5)$$

Eş.4'te $F_{\alpha;1;f_e}$, α önem düzeyini, f_e hata serbestlik derecesini, V_e varyans hatasını, n_{eff} deney tekrar sayısını ve r doğrulama deneyi tekrar sayısını göstermektedir. Eş.5'te ise N toplam deney sayısını ve T_{dof} serbestlik düzeyinin toplam ana faktörlerini belirtmektedir.

Ra ve T için $F_{0.05;1;2} = 18,51$ (F test tablosundan faydalanılarak), V_e Ra için 0.000875, T için 24.11 olarak bulunmuştur. Ra ve T için $r = 3$, $N = 9$, $T_{dof} = 6$, $n_{eff} = 1.29$ olarak hesaplanmıştır. Eş.4'te değerler yerlerine konulduğunda Güven Aralığı (CI) Ra için ± 0.134 , T için ise ± 22.24 olarak bulunmuştur. %95 güvenirlilikte tahmini ortalama optimal yüzey pürüzlülüğünün güven aralığı Ra için Eş.6'dan, T için Eş.7'den faydalanılarak hesaplanmıştır.

$$[Ra_p] - [CI] < Ra_{deneysel} < [Ra_p] + [CI] \quad (6)$$

$$[T_p] - [CI] < Ra_{deneysel} < [T_p] + [CI] \quad (7)$$

Eş.6'daki Ra için değerler yerlerine konulduğunda;

$$[0.316 - 0.134] < 0.326 < [0.316 + 0.134] = [0.182] < \mathbf{0.326} < [0.450]$$

Eş.7'deki T için değerler yerlerine konulduğunda ise;

$$[111.2 - 22.24] < 114 < [111.2 + 22.24] = [88.96] < \mathbf{114} < [133.44] \text{ sonuçlarına ulaşılmaktadır.}$$

Deneyler sonucunda elde edilen Ra için 0.326 μm , T için 114 $^{\circ}\text{C}$ değerleri güven aralığı değerleri arasında çıkmıştır. Bir başka deyişle Taguchi deney tasarımı 0.05 anlamlılık düzeyinde gerçekleşmiştir. Başarılı bir şekilde uygulanan Taguchi optimizasyonu için elde edilen optimum değerler ve deneysel değerler arasındaki farklar Tablo 11'de verilmiştir.

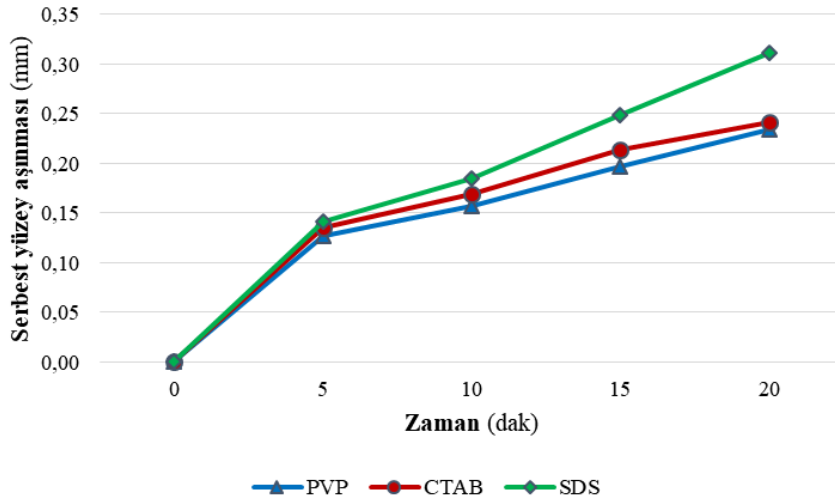
Tablo 11. Doğrulama deneylerinden elde edilen sonuçlar (Results from the validation experiments)

Kaynak	Sonuçlar		Hata
	Deneysel	Tahmini	%
<i>Yüzey pürüzlülüğü Ra</i>			
A2B2C1 (optimum)	0.326	0.316	3.07
A1B3C3 (rastgele)	0.570	0.577	1.23
<i>Kesme sıcaklığı T</i>			
A2B1C2 (optimum)	114	111.2	2.46
A3B3C2 (rastgele)	171	170.9	0.06

Tablo 11 incelendiğinde Ra için yapılan doğrulama deneyi ve tahmini değerleri arasındaki fark %3.07 mertebelerinde kalırken, T için yapılan doğrulama deneyi ve tahmini değerleri arasındaki fark %2.46 mertebelerinde kalmıştır. Ayrıca Ra ve T için rastgele seçilen seviyeler arasındaki fark ise sırasıyla %1.23 ve %0.06 düzeyindedir. Bir başka deyişle sonuçlardan yola çıkılarak optimizasyonun başarılı olduğu ifade edilebilir.

3.2. Takım Ömrü ve Aşınma Sonuçları (Tool Life and Wear Results)

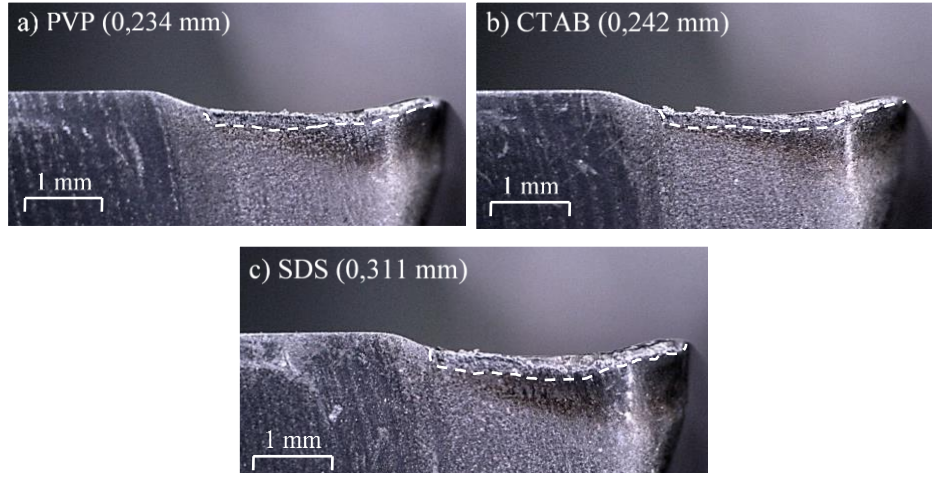
Talaşlı imalat operasyonlarında takım aşınması, zaman ve üretim maliyetleri dikkate alındığında son derece önemli bir parametredir. Kesici takım aşınma mekanizmalarını etkileyen çok sayıda faktör vardır [20]. Sürfaktanların tribolojik performans değerlendirilmesinde yüzey pürüzlülüğü Ra, kesme sıcaklığı T deneyleri Taguchi L9 tasarımına göre gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın bu bölümünde surfaktanların aynı parametrelerde Ra ve T için benzer koşulları olmadığından, kesici takım aşınma deneyleri kesme parametrelerinin aritmetik ortalamaları (160 m/dak kesme hızı, 0.15 mm/dev ilerleme) kullanılarak sabit koşullarda yürütülmüştür. Kesme hızı, ilerleme ve kesme derinliğinin (0.5 mm) sabit alındığı çalışmada 20 dakika süreyle takım ömrü deneyleri yapılmıştır. Her beş dakikalık sürelerde takım serbest yüzey aşınması ölçülerek kayıt altına alınmıştır. Deneyler PVP, CTAB ve SDS surfaktan katkılı CuO nanoakışkan koşulları altında gerçekleştirilmiştir. Aşınma deneylerinden elde edilen sonuçlar Şekil 6’da verilmiştir.



Şekil 6. Farklı surfaktan koşulları altında kesici takım ömrü sonuçları (160 m/dak kesme hızı ve 0,15 mm/dev ilerlemede) (Cutting tool life results under different surfactant conditions (160 m/min cutting speed and 0.15 mm/rev feed))

AISI 329 dubleks paslanmaz çelik malzemeye 20 dakika frezeleme işlemi sonrasında PVP surfaktan katkılı CuO nanoakışkan koşulunda kesici takım 0.234 mm aşınırken, CTAB ve SDS surfaktan katkılı CuO nanoakışkan koşullarında sırasıyla 0.242 mm ve 0.311 mm aşınmıştır. Bir başka deyişle PVP surfaktanı CTAB ve SDS surfaktanına göre kesici takım serbest yüzey aşınmasını sırasıyla %3.3 ve %27.8 oranlarında azaltmıştır. PVP surfaktanın diğer surfaktanlara göre takım aşınmasında iyi performans sergilemesini Şekil 3 yüzey pürüzlülük Ra sonuçları ve Şekil 5 kesme sıcaklığı T sonuçları destekler niteliktedir. PVP surfaktan koşulu diğer surfaktan koşullarına göre nispeten homojen karışım olmasına [21], kesici takım-talaş-ış parçası ara yüzeylerine daha iyi nüfuz etmesi, çökme ve topaklanmanın düşük mertebelerde seyretmesi [13] Ra, T ve takım aşınma sonuçlarında daha iyi performans göstermiştir sonucuna varılabilir. Şekil 7’de farklı surfaktan koşulları altında kesici takım serbest yüzey aşınma görüntüleri verilmiştir.

Şekil 7 incelendiğinde PVP ve CTAB surfaktan koşullarında serbest yüzey aşınmasının düzgün şekilde devam ettiği görülmektedir. SDS surfaktan koşulunda ise serbest yüzey aşınmasıyla birlikte takımın kopmalarına meydana geldiği ve 0.3 mm (ISO 3685’e göre) eşik değerinin aşıldığı görülmektedir. Sürfaktanların aynı parametrelerde Ra ve T için benzer koşulları olmadığından, kesici takım aşınma deneylerinin sabit koşullarda yürütüldüğü bu bölümde; PVP katkılı CuO nanoakışkanı gerek optimizasyon gerekse kesici takım aşınma sonuçlarına göre diğer surfaktanlara göre nispeten daha iyi performans göstermiştir yorumu yapılabilir. Benzer şekilde yapılan çalışmalarda çökme ve topaklanma daha düşük seviyelerde olduğundan surfaktanın tribolojik performansı daha etkili olduğu ifade edilmiştir [13, 21].



Şekil 7. Farklı surfaktan koşulları altında kesici takım serbest yüzey aşınması: a) PVP, b) CTAB, c) SDS (Vc 160 m/dak, f 0.15 mm/dev) (Cutting tool flank wear results under different surfactant conditions: a) PVP, b) CTAB, c) SDS (Vc 160 m/min, f 0.15 mm/rev))

4. GENEL DEĞERLENDİRME (GENERAL CONCLUSIONS)

Bu çalışmada; AISI 329 dubleks paslanmaz çeliğinin PVP, CTAB ve SDS surfaktan katkılı CuO nanoakışkanları kullanarak MMY koşulları altında frezelenmesinde yüzey pürüzlülük Ra, kesme sıcaklığı T ve kesici takım serbest yüzey aşınması performans kriteri olarak seçilmiştir. Deneysel sonuçlarda Ra ve T için Taguchi L9 deney tasarımı, sonuçların etki düzeylerinin belirlenmesinde ise ANOVA analizi kullanılmıştır. Deneysel çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

- Yüzey pürüzlülüğünde en optimum parametre A2B2C1 (PVP surfaktan katkılı nanoakışkan, 160 m/dak kesme hızı ve 0,10 mm/dev ilerleme) olarak belirlenmiştir. ANOVA analizleri sonucunda ise yüzey pürüzlülüğü üzerinde en etkili parametre %81.38 oran ile ilerleme olurken bunu %12.33 oran ile surfaktan ve %3.37 oran ile kesme hızı takip etmiştir.
- Kesme bölgesinde gözlenen sıcaklık sonuçlarına göre PVP surfaktanı, 120 m/dak kesme hızı ve 0,15 mm/dev ilerleme (A2B1C2) optimum koşulları oluşturmaktadır. Kesme sıcaklığı üzerinde %80.48 oranla en fazla kesme hızının etkili olduğu bunu ise %16.75 oranla surfaktan koşulları ve %1.24 oranla ilerlemenin takip ettiği ANOVA sonuçlarından elde edilmiştir.
- PVP (0.234 mm) surfaktan koşulunun CTAB (0.242 mm) ve SDS (0.311 mm) surfaktan koşullarına göre kesici takım serbest yüzey aşınmasını sırasıyla %3.3 ve %27.8 oranında azaltmıştır. PVP ve SDS surfaktan koşullarında kesici takım serbest yüzey aşınması düzlemsel olarak devam ederken, SDS surfaktan koşulunda ise kesici takım ömrünü tamamlamıştır.

Genel olarak çalışma değerlendirildiğinde; AISI 329 dubleks paslanmaz çeliğin frezelenmesinde, MQL sistemine eklenen PVP surfaktan katkılı CuO nanoakışkanların yüzey pürüzlülük, kesme sıcaklığı ve takım aşınmasında CTAB ve SDS surfaktanlı nanoakışkanlara göre üstün performans sergilemiştir. Gelecekte yapılacak olan çalışmalarda PVP surfaktanın farklı katkı oranlarıyla ve farklı nanopartiküllerle tribolojik performans değerlendirilmesi yapılabilir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENT)

Bu çalışma Düzce Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Destek Programı kapsamında desteklenmiştir. Proje Numarası: 2021.06.05.1179.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. B. Aydemir, 17-4 PH çökeltme sertleştirilmeli paslanmaz çelik kuvvet dönüştürücü yay elemanlarının iç yapısal özelliklerinin performans üzerine etkilerinin araştırılması, Doktora Tezi, Osmangazi Üniversitesi, 2003.
2. E. Çelik, Ş. Şirin, T. Kıvık, AISI 2507 süper dubleks paslanmaz çeliğinin hibrit soğutma/yağlama yöntemleri altında tornalanmasında yüzey kalitesinin incelenmesi, Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, 9: 929–42, 2021.
3. F. Zucchi, E. Angelini, Influence of heat treatments between 400–750 °C on the corrosion resistance of Duplex 329 stainless steel, British Corrosion Journal, 17 (4):184–187, 1982.
4. I. Lazoglu, Y. Altintas, Prediction of tool and chip temperature in continuous and interrupted machining, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 42: 1011–22, 2002.
5. Ç.V. Yıldırım, Ş. Şirin, T. Kıvık, Waspaloy süper alaşımının frezelenmesinde nanopartikül katkılı yağlamanın takım aşınması üzerindeki etkisinin araştırılması, Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, 7:466–76, 2019.
6. E. Şirin, Ş. Şirin, Investigation of the performance of ecological cooling/lubrication methods in the milling of AISI 316L stainless steel, Manufacturing Technologies and Applications, 2:75-84, 2021.
7. Ç.V. Yıldırım, T. Kıvık, M. Sarıkaya, F. Erzincanlı, Determination of MQL parameters contributing to sustainable machining in the milling of nickel-base superalloy waspaloy, Arabian Journal for Science and Engineering, 42: 4667–81, 2017.
8. A. Şencan Çakır, A. Duran, U. Şeker, The effect of different cooling methods to hole quality and tool life in the drilling of AA7075 and AA2024 aluminum alloys, Manufacturing Technologies and Applications, 1: 1-13, 2020.
9. Ç.V. Yıldırım, M. Sarıkaya, T. Kıvık, Ş. Şirin, The effect of addition of hBN nanoparticles to nanofluid-MQL on tool wear patterns, tool life, roughness and temperature in turning of Ni-based Inconel 625, Tribology International, 134: 443–56, 2019.
10. Ş. Şirin, Ç.V. Yıldırım, T. Kıvık, M. Sarıkaya, Performance of cryogenically treated carbide inserts under sustainable cryo-lubrication assisted milling of Inconel X750 alloy, Sustainable Materials and Technologies, 29: e00314, 2021.
11. E. Şirin, Hastelloy X süper alaşımının delinmesinde nanopartikül katkılı kesme yağlarının işleme performansı üzerindeki etkilerinin incelenmesi, Doktora Tezi, Düzce Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2021.
12. A.K. Sharma, A.K. Tiwari, A.R. Dixit, Rheological behaviour of nanofluids:A review, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 53:779–91, 2016.
13. E. Şirin, T. Kıvık, Ç.V. Yıldırım, Effects of mono/hybrid nanofluid strategies and surfactants on machining performance in the drilling of Hastelloy X, Tribology International, 157:106894, 2021.
14. C.H. Tanmai Sai Geetha, A.K. Dash, B. Kavaya, M. Amrita, Analysis of hybrid nanofluids in machining AISI 4340 using minimum quantity lubrication, Materials Today: Proceedings, 43:579–86, 2020.
15. A Eltaggaz, I Nouzil, I. Deiab, Machining Ti-6Al-4V alloy using nano-cutting fluids: investigation and analysis, Journal of Manufacturing and Materials Processing, 5: 42, 2021.
16. S.H. Musavi, B. Davoodi, S.A. Niknam, Effects of reinforced nanoparticles with surfactant on surface quality and chip formation morphology in MQL-turning of superalloys, Journal of Manufacturing Processes, 40:128–39, 2019.
17. Y. Zhai, L. Li, J. Wang, Z. Li, Evaluation of surfactant on stability and thermal performance of Al₂O₃-ethylene glycol (EG) nanofluids, Powder Technology, 343:215–24, 2019.
18. Ş. Şirin, Sürdürülebilir imalat için Inconel X 750 süper alaşımının frezelenmesinde yenilikçi soğutma/yağlama tekniklerinin işleme performansı üzerindeki etkileri, Doktora Tezi, Düzce Üniversitesi, 2020.
19. N. Khanna, P. Shah, R.W. Maruda, G.M. Krolczyk, H. Hegab, Experimental investigation and sustainability assessment to evaluate environmentally clean machining of 15-5 PH stainless steel, Journal of Manufacturing Processes, 56:1027–38, 2020.
20. U. Şeker, M. Günay, İM 322-Kesici takım tasarımı, Ders Notları, Ankara, 2008.
21. W.T. Urmi, M.M. Rahman, K. Kadirgama, D. Ramasamy, M.A. Maleque, An overview on synthesis, stability, opportunities and challenges of nanofluids. Materials Today: Proceedings, 41:30–7, 2021.