



PERFORMANCE EVALUATION OF MQL, hBN AND N₂ LUBRICATION/COOLING CONDITIONS WHEN TURNING OF AISI 904L SUPER DUPLEX STAINLESS STEEL

Şenol Şirin*¹ 

¹Düzce University, Gümüşova Vocational School, Department of Machine and Metal Technologies, Düzce, Turkey

Abstract

Original scientific paper

In the past two decades, the use of different cooling/lubrication conditions in sustainable manufacturing processes has begun to increase. Especially, efficient results were obtained in machining of materials with low machinability such as stainless steel, superalloy etc. Minimum quantity lubrication (MQL), cryogenic cooling (N₂, LN₂, CO₂, LCO₂, etc.), and nanofluid (hBN, MoS₂, graphite, MWCNT, graphene, etc.) cooling/lubrication conditions are commonly used in sustainable manufacturing processes. In this study, the performances of ecologically different cooling/lubrication conditions were evaluated. For this purpose, AISI 904L super duplex stainless steel was turned under dry, MQL, cryogenic cooling (N₂), hexagonal boron nitride doped nanofluid (hBN), MQL/N₂ hybrid and hBN/N₂ hybrid conditions. In the turning experiments, two different cutting speeds (120 and 180 m/min), constant feed (0.15 mm/rev) and constant cutting depth (0.5 mm) were selected as cutting parameters. In the experimental study, surface roughness and topography, cutting temperature, vibration, tool wear are selected as a performance criteria using TiAlN PVD coated cemented carbide cutting tools. With the data obtained at the end of the experimental study, while the N₂ condition showed the best performance at the cutting temperature, the hBN/N₂ cooling/lubrication condition showed the best performance in all other results.

Keywords: hBN nanofluid, N₂ cooling, surface topography, turning of AISI 904L, vibration.

AISI 904L SÜPER DUBLEKS PASLANMAZ ÇELİĞİN TORNALANMASINDA MMY, hBN VE N₂ SOĞUTMA/YAĞLAMA KOŞULLARININ PERFORMANS DEĞERLENDİRMESİ

Özet

Orijinal bilimsel makale

Son yirmi yılda sürdürülebilir imalat proseslerine farklı soğutma/yağlama koşullarının kullanımı artış göstermeye başlanmıştır. Özellikle işlenebilirlik özelliği düşük paslanmaz çelik, süper alaşım vb. malzemelerde iyi sonuçlar elde edilmiştir. Sürdürülebilir imalatta yaygın olarak kullanılan soğutma/yağlama koşulları arasında minimum miktarda yağlama (MMY), kriyojenik soğutma (N₂, LN₂, CO₂, LCO₂ vb.) ve nanoakışkan (hBN, MoS₂, grafit, MWCNT, grafen vb.) yer almaktadır. Bu çalışmada ekolojik farklı soğutma/yağlama koşullarının performansları değerlendirilmiştir. AISI 904L süper dubleks paslanmaz çeliği, kuru, MMY, kriyojenik soğutma (N₂), hegzagonal bor nitrid katkılı nanoakışkan (hBN), MMY/N₂ hibrit ve hBN/N₂ hibrit koşulları altında tornalanmıştır. Tornalama deneylerinde parametre olarak iki farklı kesme hızı (120 ve 180 m/dak), sabit ilerleme (0,15 mm/dev) ve sabit kesme derinliği (0,5 mm) seçilmiştir. TiAlN PVD kaplamalı sementit karbür kesici takımların kullanıldığı deneysel çalışmada performans kriteri olarak; yüzey pürüzlülüğü ve topografya, kesme sıcaklığı, titreşim, takım aşınması ve ömrü tercih edilmiştir. Deneysel çalışma sonunda elde edilen verilerle, kesme sıcaklığında en iyi performansı N₂ koşulu gösterirken, diğer tüm sonuçlarda en iyi performansı hBN/N₂ hibrit soğutma/yağlama koşulu göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: hBN nanoakışkanı, N₂ soğutma, titreşim, yüzey topografyası.

1 Giriş

AISI 904L paslanmaz çeliği, süper östenitik grubunda yer alan, üstün korozyon direnci ve mekanik özellikleri sayesinde tercih edilen bir malzemedir. Bu malzeme, denizcilik, medikal, nükleer, petrokimya gibi kritik sektörlerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Yaygın kullanımına rağmen talaş kaldırma esnasında göstermiş olduğu deformasyon sertleşmesi nedeniyle işlenebilirliği

zor malzemeler sınıfına girmektedir [1]. Ayrıca, talaş kaldırma esnasında oluşan yüksek ısı kesici takımın hızlı deforme olmasına neden olabilmektedir. Bu nedenle AISI 904L paslanmaz çeliğinin işlenmesi esnasında optimum işlenebilirlik parametrelerinin belirlenmesi oldukça önemlidir. Böylece, işleme verimliliği önemli ölçüde artırılırken üretim maliyeleri de aşağı çekilecektir. İşlenmesi zor malzemelerin talaşlı imalat yöntemiyle şekillendirilmesi esnasında işleme verimliliğini artırmanın

* Corresponding author.

E-mail address: senolsirin@düzce.edu.tr (Ş.Şirin)

Received 28 January 2022; Received in revised form 01 April 2022; Accepted 17 April 2022

2587-1943 | © 2021 IJIEA. All rights reserved.

Doi: <https://doi.org/10.46460/ijiea.1064021>

en bilindik ve etkili yollarından biri de kesme sıvısı kullanımınıdır.

Kesme sıvıları, soğutma, yağlama ve talaş kesme bölgesinden uzaklaştırma gibi kritik görevleri yerine getirmektedir. Bir başka deyişle, takım-iş parçası arasındaki sıcaklığın düşürülmesi, yüzey kalitesinin artırılması ve kesici takım ömrünün uzatılması gibi kritik noktalarda önemli iyileştirmeler sunmaktadır [2]. Buna karşın, özellikle mineral esaslı kesme sıvılarının, çevre, çalışan sağlığı ve üretim maliyetleri üzerindeki olumsuz etkileri artık bilinen bir durumdur [3]. Bu nedenle, üretim verimliliğini azaltmadan, kullanılan kesme sıvısı miktarının azaltılması son yıllarda araştırmacı ve üreticilerin zihnini sürekli meşgul etmektedir. Son yıllarda bu amaca yönelik birçok alternatif geliştirilmiş olsa da minimum miktarda yağlama (MMY) sistemi öne çıkmıştır.

MMY sistemi, 10~150 mL/saat seviyesinde yağ kullanımı ile konvansiyonel soğutma/yağlama yöntemine nazaran 1/10000 oranında tasarruf sağlayan yeni nesil bir soğutma/yağlama yöntemidir [4]. MMY sisteminde aerosol haline getirilen kesme yağı basınçlı hava aracılığıyla kesme bölgesine püskürtülmektedir. Böylece, takım-talaş-iş parçası ara yüzeyine daha iyi nüfuz edebilmekte ve çok az kesme sıvısıyla benzer veya daha iyi sonuçlar sunmaktadır. Sonuçlar birbirine yakın çıksa dahi kullanılan kesme sıvısı miktarı önemli ölçüde azaldığı için çevre ve çalışan sağlığı açısından daha tercih edilebilir hale gelmektedir. Literatürde yer alan ve MMY sistemi ile konvansiyonel soğutma sisteminin karşılaştırıldığı birçok çalışmada buna benzer sonuçlar elde edilmiştir. Örneğin; Yıldırım ve diğ. Waspaloy süper alaşımını işlerken kuru, ıslak ve MMY sistemini karşılaştırmışlardır. Araştırmacılar, ıslak ve MMY sisteminin birbirine yakın sonuçlar verdiğini ifade etmişlerdir [5]. Nouioua ve diğ. X210Cr12 çeliğini tornalarken kuru, ıslak ve MMY yöntemlerini karşılaştırmış ve MMY sisteminin daha iyi sonuçlar verdiğini belirtmişlerdir [6]. Bir başka çalışmada, Elbah ve diğ. AISI 4140 çeliğini sert tornalama işlemine tabi tutarken soğutma/yağlama yöntemi olarak kuru, ıslak ve MMY sistemini karşılaştırmışlardır. Deney sonuçlarını analiz eden araştırmacılar, parametre opsiyonlarına bağlı olarak MMY sisteminin daha iyi sonuçlar verdiğini gözlemlemişlerdir [7]. Masoudi ve diğ. AISI 1045 çeliğini tornalarken kuru, ıslak ve MMY sistemlerini karşılaştırmışlar ve MMY sisteminin daha iyi sonuç verdiğini ifade etmişlerdir [8]. Bununla beraber, MMY sisteminin hafif ve orta işleme koşullarında daha iyi olduğu, ağır işleme koşullarında özellikle soğutma açısından yeterli verimi vermediği son dönemde tartışılan bir durumdur [9]. Bu nedenle, MMY sisteminin ağır işleme koşullarında etkinliğinin artırılması oldukça önemlidir. Bu noktada ön plana çıkan yöntemler ise nanoakışkanlar, kriyojenik soğutma ve bunların beraber kullanıldığı hibrit soğutma/yağlama yöntemleridir.

Nanoakışkanlar, nano boyutta (genelde <100 nm) katı partiküllerin kesme sıvısı içerisinde ağırlıkça veya hacimce farklı oranlarda eklenmesiyle hazırlanmaktadır. Nanopartiküller, ekolojik ve çevreci olmaları nedeniyle tercih edilirken termal iletim katsayılarının ve ısı taşıma kapasitelerinin yüksek olması nedeniyle içerisine katıldıkları kesme sıvısının özelliklerini geliştirmektedirler [10]. Touggui ve diğ. MoS₂, MWCNT, grafen, MWCNT/MoS₂ ve grafen/MoS₂ katkı maddelerini

ekledikleri nanoakışkanları saf MMY ve kuru işlemeyle kıyaslamışlardır [11]. Deney sonuçlarını analiz eden araştırmacılar nanoakışkanların bariz bir şekilde iyileştirme sunduğunu rapor etmişlerdir. Babu ve diğ. H13 çeliğini tornalarken klasik kesme sıvısı ve saf MMY sistemini nano-bakır katkılı nanoakışkan ile karşılaştırmışlardır. Deney sonuçlarına göre araştırmacılar, yüzey pürüzlülüğü, kesme sıcaklığı ve takım aşınması konusunda nanoakışkanın önemli iyileştirmeler sunduğunu rapor etmişlerdir [12]. Yıldırım ve diğ. Waspaloy süperalaşımının işlenmesi esnasında, Al₂O₃ katkılı nanoakışkanı kuru ve saf MMY sistemi ile karşılaştırmışlardır. Çıktı parametresi olarak takım aşınmasını dikkate alan araştırmacılar nanoakışkan kullanılan deneylerde önemli iyileştirmeler olduğunu gözlemlemişlerdir [13]. Diğer bir alternatif yöntem ise kriyojenik soğutma yöntemidir.

Kriyojenik soğutma yöntemi, işleme esnasında yüksek sıcaklıkların oluştuğu, özellikle nikel, titanyum ve paslanmaz çeliklerin işlenmesi esnasında kullanılmaktadır [14,15]. Bu yöntemde helyum, hidrojen, neon, nitrojen, oksijen, karbondioksit vb. gazlar kesme bölgesine basınçlı bir şekilde gönderilmektedir. Bu gazlar içerisinde en fazla tercih edileni ise gaz formda (N₂) veya sıvı formda (LN₂) nitrojendir. Ancak, sıvı nitrojen soğutma ile gerçekleştirilen talaş kaldırma proseslerinde (tornalama frezeleme, delme, taşlama vb.) kesme bölgesindeki sıcaklığı çok düşürdüğü için kesme mekaniği bakımından dezavantaj oluşturduğu bilinmektedir [16]. MMY yönteminin yağlama ve kriyojenik yöntemin soğutma performanslarını kombine eden hibrit soğutma/yağlama yöntemleri, konvansiyonel yağlamaya güçlü bir alternatif olan başka bir yöntemdir. Yıldırım, Inconel 625 süper alaşımını tornalarken kuru, saf MMY, LN₂, nanoMMY (hBN, Al₂O₃ ve hBN + Al₂O₃), LN₂ + MMY ve LN₂ + nanoMMY sistemlerinin çeşitli kombinasyonlarından oluşan geniş bir soğutma/yağlama yöntemi çeşidini karşılaştırmıştır. Deney sonuçlarını analiz eden araştırmacı en iyi sonucu kriyojenik ve nanoakışkanın beraber kullanıldığı hibrit soğutmanın verdiğini belirtmişlerdir [17]. Gupta ve diğ. Ti6Al4V alaşımının işlenmesi esnasında kuru, LN₂ ve LN₂ + MMY sistemlerini karşılaştırarak kriyojenik ve hibrit soğutmanın etkisini görmek istemişlerdir. Araştırmacılar çalışmanın sonunda hibrit soğutmanın daha iyi sonuç verdiğini gözlemlemişlerdir [18]. Bir başka çalışmada, Shokrani ve diğ. Ti6Al4V alaşımını işlerken ıslak, MMY, kriyojenik ve hibrit soğutmayı karşılaştırmışlardır. Deney sonuçlarını analiz eden araştırmacılar, birçok kesme parametresinde en iyi sonucu hibrit soğutmanın verdiğini ifade etmişlerdir [19].

Literatür araştırmasında da görüldüğü üzere klasik kesme sıvısının azaltılması için birçok alternatif yöntem üzerinde çalışmalar devam etmektedir. Ancak, burada en önemli kriter verimliliği düşürülmeden, mümkünse artırılarak, kesme sıvısının azaltılmasıdır. Bunun için çok geniş bir malzeme, işleme yöntemi, katkı maddesi, karıştırma oranı vb. gibi temel parametrelere yönelik araştırmaların yapılması gerekmektedir. Bu çalışmada da bu amaca yönelik olarak kuru, MMY, N₂, MMY/N₂, nano MMY (hBN) ve hBN/N₂ gibi geniş bir soğutma/yağlama koşulu denenmiştir. İşlenebilirlik deneylerinde iş parçası malzemesi olarak AISI 904L tercih edilmiştir. Ayrıca

soğutma/yağlama yönteminin farklı kesme parametreleri altındaki durumunu görerek daha kapsamlı bir araştırma yapabilmek için iki farklı kesme hızı deney tasarımına dahil edilmiştir. Çalışmaya ait deneysel prosedür, bulgular ve sonuçlar aşağıda bölümler halinde detaylı olarak sunulmuştur.

2 Malzeme ve Yöntem

2.1 Deneylerde Kullanılan Malzeme, Kesici Takım ve Takım Tezgahı

Tornalama deneyleri için süper östenitik AISI 904L dubleks malzemesi ticari halde temin edilmiş olup, malzemeye herhangi bir ilave proses (ısıtım işlem vb.) uygulanmamıştır. AISI 904L malzeme 60 mm çapında ve 280 mm uzunlukta, CNC torna merkezine (ayna-punta arasına) rijit bir şekilde bağlanmıştır. Malzemeye ait kimyasal bileşim ve mekanik özellikler sırasıyla Tablo 1 ve Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 1. AISI 904L malzeme kimyasal bileşimi (%).

Cr	Ni	Mo	Cu	C	S	Si	P	Mn
				maks.	min.	maks.	maks.	maks.
20	25	4,5	1,6	0,12	0,001	0,70	0,045	1,25

Tablo 2. AISI 904L malzeme mekanik özellikleri.

Özgül Ağırlık (kg/mm ³)	Kopma (MPa)	Akma (MPa)	Uzama (A5 %)	Sertlik (HB)
8000	490~520	230	35	<330

Tornalama deneylerinde Sumitomo marka ISO CNMG 120404 kodlu, 431 EUP kalite TiAlN PVD kaplamalı sementit karbür kesici takımlar kullanılmıştır. Kesici takımların rijit bir şekilde bağlanmasında TBurst PCLNR2020M12-TB takım kateri kullanılmıştır.

Deneylerde azami devri 4500 dev/dak, 7,5 kW motor gücüne sahip Accuway JT150 CNC torna merkezi kullanılmıştır. Tornalama deneyleri iki farklı kesme hızı (120 ve 180 m/dak), sabit ilerleme (0,15 mm/dev) ve kesme derinliğinde (0,5 mm) gerçekleştirilmiştir.

2.2 Soğutma/Yağlama Koşulları

Sürdürülebilir imalat proseslerinde ekolojik kaygılar göz önüne alındığında, soğutma/yağlama koşulları son derece önem arz etmektedir. Bu bağlamda araştırmacılar ve makine endüstrisindeki işletmeler, soğutma/yağlama üzerine çalışmalarını sürdürmektedirler. Bu çalışmada doğayla dost, ekolojik soğutma/yağlama koşullarının performansının incelenmesi üzerine bir dizi deney yapılmıştır. Soğutma koşulu olarak; kuru¹, MMY², N₂³, MMY/N₂⁴, hBN⁵ ve hBN/N₂⁶ olmak üzere 6 farklı koşul tercih edilmiştir. MMY soğutma/yağlama koşulunda, SKF LubriLean Vario model bir cihaz kullanılmıştır. MMY cihazı içerisinde, ağır metal ve klor içermeyen, biyolojik olarak parçalanabilen Opet Fuchs PlantoCut 10 SR bitkisel esaslı yağ kullanılmıştır. Bitkisel esaslı yağ sistem içerisinde pülverize hale getirilerek, kesme bölgesine 2 mm çapında bir nozul ile basınçlı bir şekilde gönderilmiştir. Kriyojenik soğutma için 165 L kapasiteye sahip Taylor Wharton XL 45 HP saklama silindiri kullanılmıştır. Silindir içerisindeki gaz fazındaki N₂, vakum ceketli

hortum vasıtasıyla 3 mm çapındaki bir nozul ile basınçlı bir şekilde kesme bölgesine tatbik edilmiştir. Hem MMY hem de kriyojenik nozul, kesici takımın üst bölgesine ve kesme bölgesine 25 mm mesafede konumlandırılmıştır.

Bitkisel esaslı yağın içerisine hacimce %0,6 oranında hBN nanopartikülleri eklenerek nanoakışkanlar hazırlanmıştır. Literatürde yer alan çalışmalarda nanoakışkan karışımlar için hacimce %0,5~0,75 oran aralığının optimum olduğu ifade edilmiştir [2]. Bu çalışmada iki oranın ara değeri alınarak karışım oranı hacimce %0,6 olarak belirlenmiştir. hBN nanopartikül özellikleri Tablo 3’te verilmiştir.

Tablo 3. hBN nanopartikül özellikleri.

Boyut (nm)	Safılık (%)	Yoğunluk (gr/cm ³)	Şekil	Renk
80	99,9	2,3	küresel	beyaz

Nanoakışkan hazırlamada iki adım yöntemi uygulanmış ve karıştırma prosesi üç farklı aşamada gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada, dijital mekanik karıştırıcı kullanılarak (Daihan HS100D) bitkisel esaslı yağa eklenen hBN nanopartikülleri 750 dev/dak hızta ve 60 dakika süreyle karıştırılmıştır. Ardından bitkisel esaslı yağa dağılmaya başlayan hBN nanopartiküllerini, bir ultrasonik homojenizatör (Bandelin Sonopuls HD3200) yardımıyla 200 W, 20 kHz frekansta 30 dakika süreyle karışıma devam edilmiştir. Son aşamada manyetik karıştırıcı (Termal N11151M) kullanılarak 1500 dev/dak hızda 120 dakika süre sonunda karıştırma prosesi sona erdirilmiştir. Elde edilen hBN nanoakışkanı taze bir şekilde MMY cihazına eklenerek bekletilmeden deneyler gerçekleştirilmiştir. Literatürdeki çalışmalarda nanoakışkanlara eklenen katkı maddelerinin yağlayıcılık performansını azaltması, köpük oluşturması ve viskoziteyi artırması gibi dezavantajlarının bulunduğu ifade edilmektedir [2,9,16]. Bu yüzden hazırlanan nanoakışkan karışıma yüzey aktif maddesi gibi başka ilave bir katkı eklenmemiştir.

Tüm deneylere ait kullanılan parametreler Tablo 4’te verilmiştir.

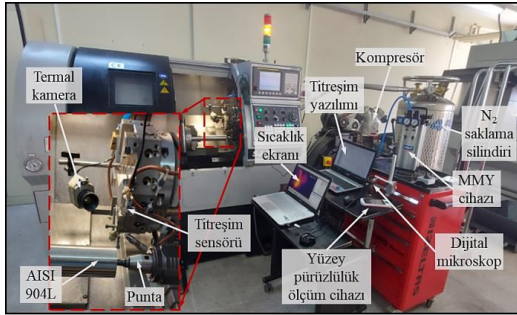
Tablo 4. Deney parametreleri.

Tezgah	Accuway JT150
İş Parçası	AISI 904L (Ø60 × 280 mm)
Kesici Takım	PVD CNMG 120404 sementit karbür
Kesme Parametreleri	Kesme hızı 120 ve 180 m/dak, İlerleme 0,15 mm/dev, Kesme derinliği 0,5 mm
Kesme Koşulları	kuru ¹ , MMY ² , N ₂ ³ , MMY/N ₂ ⁴ , hBN ⁵ ve hBN/N ₂ ⁶
Kesme Yağı	Opet Fuchs PlantoCut 10 SR (Kinematik viskozite 10 mm ² /sn, Yoğunluk 0,86 gr/mL, Parlama noktası 206 °C)
MMY	SKF LubriLean Vario, Basınç 8 bar, Debi 80 mL/saat, Nozul çapı 2 mm
Kriyojenik	N ₂ , Taylor Wharton XL 45 HP, Basınç 15 bar, Kapasite 165 L, Nozul çapı 3 mm

2.3 Deneysel Ölçümler

Yüzey pürüzlülük ölçümlerinde Mahr Marsurf PS10 taşınabilir cihaz kullanılmıştır. Her ölçüm öncesinde cihaz doğrulama bloğuyla kalibre edilmiştir. Yüzey pürüzlülük ölçümleri ISO 4287 standardına göre, 4 mm değerlendirme mesafesinde ve 0,8 mm örneklem uzunluğunda

gerçekleştirilmiştir. Tornalanan her bir yüzey olası oksitlemenin önüne geçme adına bekletilmeden ve işlenen yüzeyin üç farklı bölgesinden yüzey pürüzlülük (Ra) değerleri ölçülmüştür. Ölçülen değerlerin aritmetik ortalaması alınarak yüzey pürüzlülük değerleri belirlenmiştir. İşlenen yüzeylerin 3B topografyaları Phase View marka cihaz kullanılarak ölçülmüştür. Tornalama işlemi esnasında, kesme bölgesinde oluşan maksimum sıcaklık değerinin ölçülmesinde gerçek görüntüleme yapan Optris marka PI450 kızılötesi termal kamera kullanılmıştır. Cihaz üretici tavsiyesi ve katalog değerleri esas alınarak AISI 904L için emisivite değeri 0,6 sabit alınmıştır. Kesme işlemi esnasında titreşim tepe değerleri, manyetik sensörlü, 10 Hz ~1 kHz frekans aralığına, RMS veya titreşim tepe değer fonksiyonlarına sahip, Extech marka 461880 titreşim takometresi kullanılarak tespit edilmiştir. Cihaz manyetik sensörü katerin arkasına sabitlenerek tüm tornalama işlemi esnasında titreşim verileri yazılım sayesinde kayıt altına alınmıştır. Kesici takım yanak aşınmalarının tespit edilmesinde DinoLite marka AM791MZT dijital mikroskop kullanılmıştır. Deney seti Şekil 1’de verilmiştir.



Şekil 1. Deney seti.

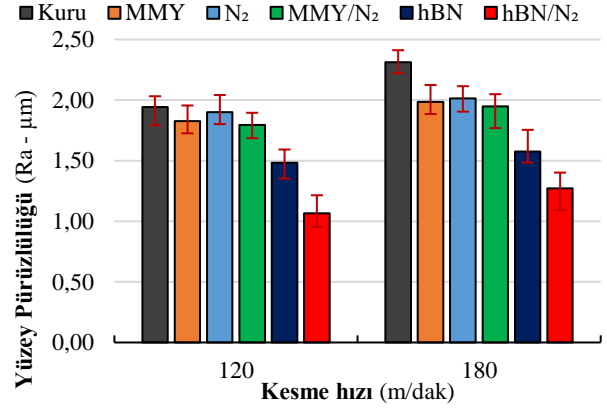
3 Sonuçlar ve Tartışma

3.1 Yüzey Pürüzlülüğü ve Topografyası

Yüzey pürüzlülüğü, bir iş parçasının yüzeyinde imalat yönteminden kaynaklanan takım izleri, sapmalar ve dalgalanmalar gibi hataların toplamına verilen isimdir. Bu hatalar, makine elemanları arasındaki gerçek temas yüzeylerinin azalmasına, sürtünmenin artmasına, aşınmanın hızlanmasına, iş parçası yorulma ve çentik darbe dayanımının azalmasına sebep olabilmektedir. ISO 4287:1997 standardında [20] farklı pürüzlülük parametreleri (Ra-pürüzlülük ortalaması, Rt-toplam profil yüksekliği, Rz-profilin maksimum yüksekliği, Rp-maksimum tepe yüksekliği vb.) tanımlanmış olup, bu çalışmada metal işleme endüstrisinde de çok fazla kullanılan Ra tercih edilmiştir. Tornalama işlemi sonrasında olası bir oksitlenmeden kaçınmak adına işlenen yüzeyler temizlenerek bekletilmeden ölçülmüştür. İki farklı kesme hızında (120 ve 180 m/dak), sabit ilerleme (0,15 mm/dev) ve kesme derinliğinde (0,5 mm) gerçekleştirilen tornalama işlemi sonrası, ölçülen Ra değerleri Şekil 2’de verilmiştir.

Şekil 2 incelendiğinde, en düşük Ra değerinin (1,065 μm) hBN/N₂ koşulunda ve 120 m/dak kesme hızında olduğu anlaşılmaktadır. Bunu 120 ve 180 m/dak kesme hızlarında da sırasıyla; hBN, MMY/N₂, MMY, N₂ ve kuru koşulları takip etmiştir. Ra değerleri, 120 m/dak kesme

hızında, hBN/N₂, hBN, MMY/N₂, MMY ve N₂ koşulları, kuru koşula göre sırasıyla; %45,19, %23,64, %7,52, %5,97 ve %2,06 oranında azalmıştır. Benzer trend 180 m/dak kesme hızında görülmektedir. En düşük Ra değerinin hBN/N₂ ortamında elde edilmiş olması, hBN nanoakışkanın yağlama ve N₂’nin soğutma performansı ile açıklanabilir.

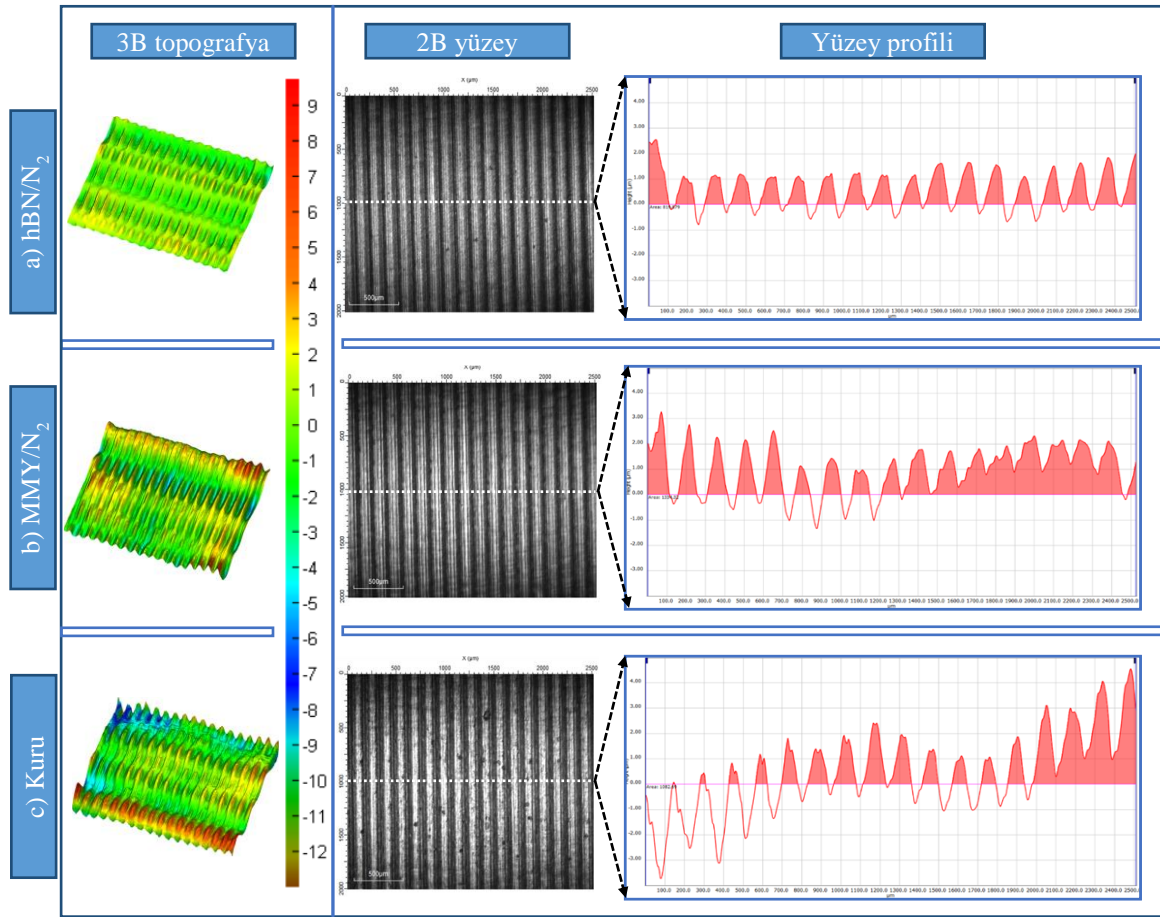


Şekil 2. Farklı soğutma/yağlama koşulları altında elde edilen yüzey pürüzlülük Ra sonuçları.

hBN nanoakışkan içerisinde küresel nano ölçekli partiküller işlenen yüzeylerdeki mikron mertebesinde çatlaklara girerek tamir etkisi oluşturmaktadır. Ayrıca hBN partikülleri iş parçasında yer alan küçük çapık kalıntıları temizleyerek parlatma etkisi de oluşturmaktadır [16]. Benzer durum literatürde yer alan çalışmalarda da ele alınmış olup hem tamir hem de parlatma etkisinin iş parçası yüzey pürüzlülüğünü azalttığı ifade edilmiştir [2,21,22]. Benzer durumun bu çalışmada da olduğundan bahsedilebilir. N₂’nin kesme bölgesinde yer alan aşırı sıcaklığı azalttığı (Şekil 4) ve hBN ile kombine edilmesiyle, hibrit soğutma/yağlamanın daha etkili olduğu düşünülmektedir. 120 ve 180 m/dak kesme hızında en düşük Ra değerlerine hBN/N₂ koşulunun sahip olması (Şekil 2) da bu durumu doğrular niteliktedir.

En yüksek Ra değeri (2,312 μm) beklendiği üzere herhangi bir soğutma/yağlamanın kullanılmadığı kuru ortamda elde edilmiştir. Bunu ise N₂ soğutma koşulu takip etmiştir (2,012 μm). N₂ koşulunda ise soğutma olmasına rağmen yağlayıcı bir ajanın bulunmaması kuru koşula en yüksek Ra değerine sahip olmasına neden olmuştur. Ra pürüzlülük ölçüm sonuçlarıyla (Şekil 2) işlenen yüzeylere ait üç boyutlu (3B) topografya ölçüm sonuçları benzerlik göstermektedir.

Şekil 3’te en iyi, ortalama ve en kötü Ra sonuçlarına sahip olan hBN/N₂, MMY/N₂ ve kuru koşulların 3B topografya, 2B yüzey ve yüzey profilleri verilmiştir. Şekil incelendiğinde hBN/N₂ ortamında tepe ve çukurların daha yüzey olduğu, yüzey profillerinin daha düzgün trende sahip olduğu anlaşılmaktadır. Bunun asıl sebebi, hBN nanoakışkanının kesme bölgesinde etkin yağlayıcı tribo film tabakası oluşturması ve N₂ kriyojenik soğutmanın kesme sıcaklığını optimal düzeylere çekmesi şeklinde ifade edilebilir. Benzer şekilde yapılan çalışmalarda nanoakışkanların kesme bölgesinde takım-talaş-ış parçası ara yüzeylerinde etkin bir koruyucu yağ bariyeri sağlayarak sürtünmeyi minimize ettiği ifade edilmektedir [23].



Şekil 3. Farklı soğutma/yağlama koşulları altında elde edilen yüzey topografya sonuçları; a) hBN/N₂, b) MMY/N₂ ve c) Kuru (180 m/dak kesme hızında).

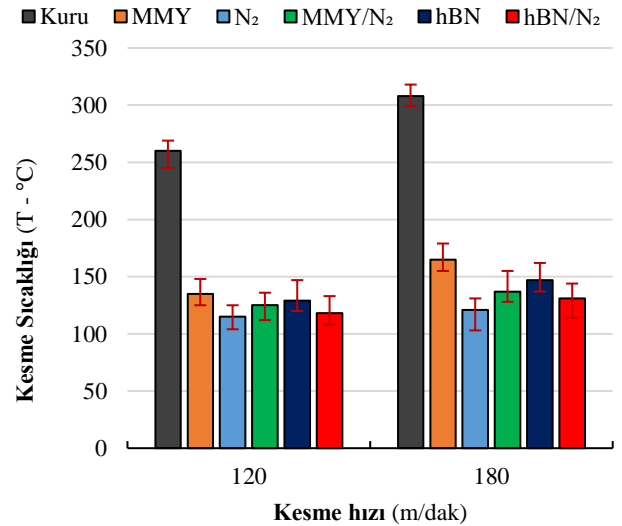
Şekil 3-b MMY/N₂ yüzey topografya sonuçları bu durumu doğrular niteliktedir. Kuru koşula göre nispeten daha iyi yüzey topografyaya sahip olmasına rağmen hBN/N₂ koşulunun gerisinde kalmıştır. Burada, zayıf Van der Waals kuvvetine sahip hBN nanopartiküllerinin bitkisel esaslı yağın içerisinde homojen dağılmasıyla kesme bölgesinde yastıklama etkisi ve yuvarlanma etkisi devreye girmektedir [16,24]. Bu sayede daha etkili bir soğutma/yağlama sağlanmış olduğu yorumu yapılabilir. Beklendiği üzere, en kötü topografya sonucu ise Ra grafiğinde (Şekil 2) olduğu gibi herhangi bir soğutma/yağlama koşulunun kullanılmadığı kuru koşul altında elde edilmiştir.

3.2 Kesme Sıcaklığı

Tornalama esnasında plastik deformasyon nedeniyle ısının çoğu birinci deformasyon bölgesinde meydana gelmektedir. Kesici takım ve iş parçasının sürekli teması sonucu ortaya çıkan sürtünme kaynaklı ısıların kontrol altına alınması son derece önemlidir. Bu çalışmada farklı soğutma/yağlama koşulları altında gerçekleştirilen tornalama deneylerinde kesme sıcaklıkları bir kızılötesi kamerayla kayıt altına alınmıştır. Kesme bölgesinde 120 ve 180 m/dak kesme hızlarında maksimum kesme sıcaklık değerleri Şekil 4'te verilmiştir.

Şekil 4 kesme sıcaklığı grafiği incelendiğinde en düşük kesme sıcaklığı değerinin 120 m/dak kesme hızında ve N₂ kriyojenik koşulunda elde edildiği (115 °C) anlaşılmaktadır. Bunu sırasıyla, hBN/N₂ (118 °C),

MMY/N₂ (125 °C), hBN (129 °C), MMY (135 °C) ve kuru (260 °C) koşulları takip etmiştir.



Şekil 4. Farklı soğutma/yağlama koşulları altında elde edilen kesme sıcaklığı sonuçları

Kesme hızının 120'den 180 m/dak'ya çıkması, kesme sıcaklığı değerlerini artırsa da tüm koşullarda trend benzer düzeyde seyretmiştir. En yüksek kesme sıcaklığı değeri (308 °C) 180 m/dak kesme hızında ve kuru koşulda kaydedilmiştir. Kuru koşula göre 180 m/dak kesme hızında kesme sıcaklığı değerleri N₂, hBN/N₂, MMY/N₂, hBN ve MMY koşullarına göre sırasıyla, %60,71,

%57,47, %55,52, %52,27 ve %46,43 oranında azalma göstermiştir. N_2 koşulunun ardından kesme sıcaklığında en fazla düşüşü hBN/ N_2 koşulu sağlamıştır. hBN nanopartikülleri yağlayıcılık özelliği yanında üstün termal iletim katsayısına sahiptirler [9]. Bu durum, hBN nanopartikülleri kesme bölgesindeki sıcaklığın tahliyesinde önemli bir görev üstlenmiştir şeklinde yorumlanabilir.

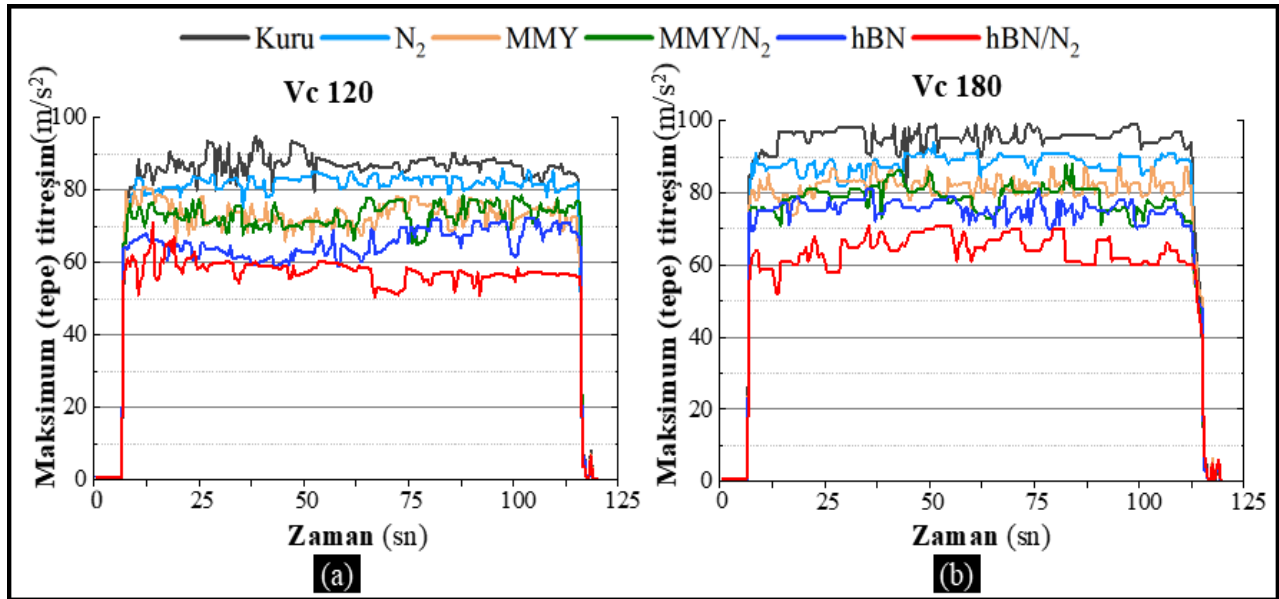
3.3 Titreşim

Bu bölümde, AISI 904L süper östenitik paslanmaz çeliğinin kuru, N_2 , MMY, MMY/ N_2 , hBN ve hBN/ N_2 soğutma koşulları altında tornalanması esnasında elde edilen maksimum titreşim tepe değerleri ölçümleri değerlendirilmiştir. Farklı kesme hızında (120 ve 180 m/dak) ölçülen maksimum titreşim tepe değerleri Şekil 5'te verilmiştir.

Şekil 5 titreşim grafiği incelendiğinde, hem 120 hem de 180 m/dak kesme hızlarında tornalama süresi boyunca en düşük titreşim değerinin hBN/ N_2 hibrit soğutma koşulunda elde edildiği anlaşılmaktadır. Tornalama süresi boyunca ölçülen titreşim tepe değerlerinin (120 m/dak kesme hızında) ortalamaları alındığında en düşük titreşim ortalama değeri (52,691 m/s^2) hBN/ N_2 koşulunda elde edilirken, en yüksek titreşim ortalama değeri (79,439 m/s^2) kuru koşulda elde edilmiştir. Yani, hBN/ N_2 koşulu kuru koşula göre titreşim ortalama değerinde %33,67

oranında azalmıştır. Elde edilen titreşim sonuçları yüzey pürüzlülük sonuçlarıyla (Şekil 2) örtüşmektedir. Titreşim değeri diğer koşullara göre nispeten kötü olan kuru koşulun Ra değeri diğer koşullara göre daha yüksek çıkmıştır. Kesici takım AISI 904L pürüzlü yüzeylerinden geçerken tezgah ve takıma etkiyen kuvveti artırmakta, bu da titreşim seviyesinin artmasına yol açmaktadır [25].

Nanoakışkan içeriğindeki katı partiküller iş parçası yüzeyinde mikron çatlaklara yerleşebilmektedir [24]. Tamir etkisi adı verilen bu mekanizma sayesinde çukurlardan geçerken kesici takım hasarı minimize edilerek titreşim seviyelerinin düşürülmesine katkı sağladığı düşünülmektedir. Ayrıca yağlama ve soğutma koşullarının her ikisini de içerisinde barındıran hBN/ N_2 koşulu kesici takım-talaş-ış parçası ara yüzeylerinde etkin tribo film tabakası oluşturmaktadır. Bu durum tribo film tabaka bariyer görevi görerek titreşim seviyelerini düşürmüştür, ifadesi ile açıklanabilir. Titreşim ortalama değerleri büyükten küçüğe doğru koşullara göre sıralanacak olursa; kuru > N_2 > MMY > MMY/ N_2 > hBN > hBN/ N_2 sonucu karşımıza çıkmaktadır. Bir başka ifadeyle 120 m/dak kesme hızında kuru koşula göre; N_2 , MMY, MMY/ N_2 , hBN ve hBN/ N_2 koşulları sırasıyla, %5,96, %15,30, %24,22 ve %52,69 oranında titreşim ortalama değerleri azalmıştır. Kesme hızının artmasıyla titreşim değerleri bir miktar artış gösterse de soğutma/yağlama koşullarındaki trend benzer düzeyde seyretmiştir.



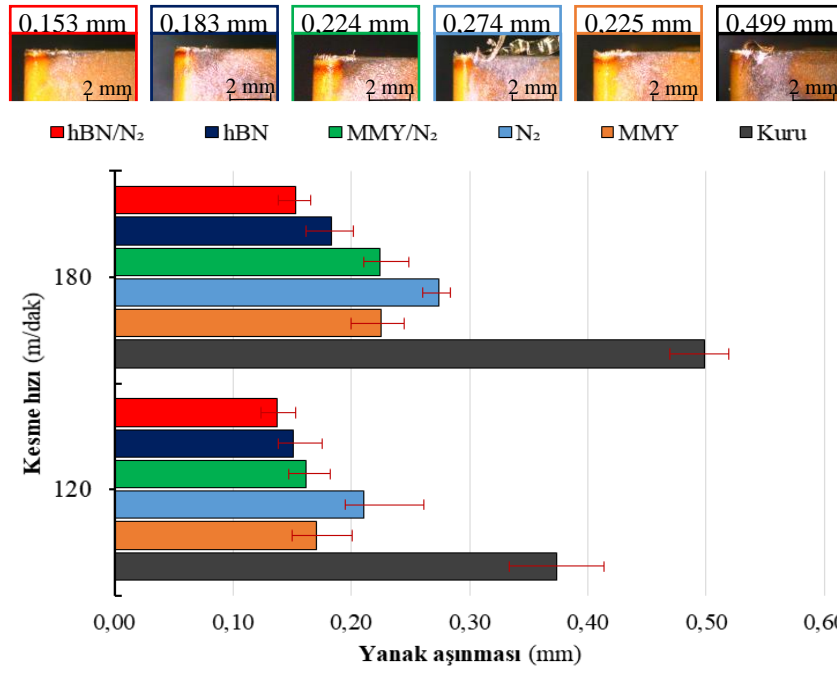
Şekil 5. Farklı soğutma/yağlama koşulları altında elde edilen titreşim tepe değerleri, a) 120 m/dak kesme hızında ve b) 180 m/dak kesme hızında

3.4 Takım Aşınması

Kesici takım, işleme esnasında çeşitli faktör veya faktörlerin bir araya gelmesiyle aşınmaya başlar ve servis ömrü dolana kadar işleme yapmaya devam eder. Aşınmaya neden olan bazı faktörleri sıcaklık, soğutma/yağlama koşulu, uygun olmayan kesme parametreleri, iş parçası malzemesi, uygun kesici takım seçilmeyişi, takım-ış parçası kimyasal eğilimi, titreşim ve kötü yüzey vb. olarak sıralanabilir. AISI 904L süper dubleks paslanmaz çeliğinin farklı koşullar altında ve farklı kesme hızlarında tornalanması sonucunda kesici

takımda meydana gelen yanak aşınma değerleri ve aşınma görüntüleri Şekil 6'da verilmiştir. Yanak aşınma değerleri 120 ve 180 m/dak kesme hızında ve 60000 mm^3 talaş hacmi sonrasında ölçülerek kayıt altına alınmıştır.

Şekil 6 incelendiğinde en düşük yanak aşınmasının her iki kesme hızında da (120 ve 180 m/dak) hBN/ N_2 koşullarında elde edildiği anlaşılmaktadır. hBN nanoakışkan içerisinde yer alan yağlayıcı katı partiküllerin kesici takım-talaş-ış parçası ara yüzeylerinde yuvarlanma etkisi göstermesiyle sürtünmeyi azalttığı ve aşınma mekanizmalarını geciktirdiği şeklinde durum açıklanabilir.



Şekil 6. Farklı soğutma/yağlama koşulları altında elde edilen yanak aşınma değerleri ve aşınma görüntüleri (60000 mm³ talaş hacmi sonrası).

Benzer şekilde, Yıldırım ve diğ. yaptıkları çalışmada hBN nanoakışkanının yuvarlanma, tamir ve parlatma etkisiyle, aşınma mekanizmasını geciktirdiğini ifade etmişlerdir [21]. Kriyojenik N₂ soğutmanın hBN ile kombine edilmesiyle kesme sıcaklığı değerleri hBN nanoakışkan koşuluna göre %10,9 oranında azalmıştır (Şekil 4). Sıcaklığın azalması ve üstün yağlama ve soğutmanın bir arada kombine edilmesi kesici takım aşınma mekanizmalarının gecikmesini sağlamıştır, yorumu yapılabilir. En yüksek yanak aşınma değeri beklediği üzere herhangi bir soğutma/yağlamanın kullanılmadığı kuru koşul altında ve 180 m/dak kesme hızında elde edilmiştir (0,499 mm). Kesme hızının artması kesme sıcaklığı, titreşim değerlerini artırmış ve bu da kesici takım aşınma mekanizmaların hızlı artmasına neden olmuştur. Yanak aşınma değerleri (180 m/dak kesme hızında) büyükten küçüğe doğru; kuru > N₂ > MMY > MMY/N₂ > hBN > hBN/N₂ şeklinde sıralanabilir. Bir başka deyişle kuru koşula göre yanak aşınma değerleri N₂, MMY, MMY/N₂, hBN ve hBN/N₂ koşullarında sırasıyla %45,10, %54,91, %55,11, %63,33 ve %69,34 oranında azalma göstermiştir. Kuru koşula göre daha düşük aşınma değeri elde edilmesine rağmen diğer koşullara göre N₂ koşulunda daha yüksek yanak aşınma değeri elde edilmiştir. Kesme sıcaklık sonuçlarında en düşük kesme sıcaklığının N₂ koşulunda elde edildiği (Şekil 4) önceki bölümlerde ifade edilmişti. N₂ koşulu, AISI 904L çeliğinin tormalanması esnasında plastik deformasyona yardımcı sıcaklığı düşük mertebelere çektiğinden talaşın iş parçasından ayrılmasında güçlük yaşanmıştır. Literatürde yapılan çalışmalarda kriyojenik soğutmanın talaşın iş parçası yüzeyine yapıştığı ve iş parçasından ayrılmasında güçlük yaşandığı ifade edilmiştir [16,26]. Şekil 6 incelenmeye devam edildiğinde 180 m/dak kesme hızında elde edilen aşınma görüntülerinde N₂ koşulunda talaşların kesici takıma yapıştığı açıkça görülmektedir. Bu durum ise kriyojenik soğutma ile ilgili bahsedilen iddiayı da güçlendirir niteliktedir. Genel olarak yanak aşınma bölümü

değerlendirildiğinde tüm kesme hızlarında, en iyi performansı hBN/N₂ koşulu altında elde edilmiştir yorumu yapılabilir.

4 Genel Sonuçlar

Bu çalışmada AISI 904L süper östenitik paslanmaz çeliği kuru, MMY, N₂, MMY/N₂, hBN, hBN/N₂ olmak üzere 6 farklı koşulda ve iki farklı kesme hızında (120 ve 180 m/dak) tormalanmıştır. Tormalama deneylerinden ve yapılan analizlerden elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

- Yüzey pürüzlülük sonuçlarına göre en düşük Ra hBN/N₂ koşulunda (1,065 µm) ve 120 m/dak kesme hızında elde edilmiştir. En yüksek Ra ise kuru koşulunda (2,312 µm) elde edilmiştir.
- Yüzey topografya görüntülerinde ise en iyi performansı hBN/N₂ koşulu göstermiştir.
- Kesme sıcaklık değerleri en düşük N₂ koşulunda 120 m/dak kesme hızında elde edilirken (115 °C) bunu sırasıyla, hBN/N₂ (118 °C), MMY/N₂ (125 °C), hBN (129 °C), MMY (135°C) ve kuru (260 °C) koşulları takip etmiştir.
- Kesme hızının artması kesme sıcaklığı değerlerini de bir miktar artırmıştır.
- En düşük titreşim tepe değerleri hBN/N₂ koşulunda kaydedilmiştir. Bunu sırasıyla hBN, MMY/N₂, MMY, N₂ ve kuru koşullar takip etmiştir.
- Takım aşınmasında en iyi performansı yine hBN/N₂ koşulu göstermiştir. Kuru koşula göre yanak aşınma değerleri N₂, MMY, MMY/N₂, hBN ve hBN/N₂ koşullarına göre sırasıyla %45,10, %54,91, %55,11, %63,33 ve %69,34 oranında azalmıştır.

Genel olarak değerlendirildiğinde; bu çalışmada AISI 904L süper dubleks paslanmaz çeliğinin tormalanmasında, hBN/N₂ koşulu diğer koşullara göre daha üstün performans göstermiştir.

Açıklamalar

Bu çalışmada Etik Kurul Onay belgesine gerek bulunmamaktadır.

Kaynaklar

- [1] O'Sullivan, D., & Cotterell, M. (2002). Machinability of austenitic stainless steel SS303. *Journal of Materials Processing Technology*, 124(1–2), 153–159.
- [2] Şirin, Ş., & Kıvak, T. (2019). Performances of different eco-friendly nanofluid lubricants in the milling of Inconel X-750 superalloy. *Tribology International*, 137, 180–192.
- [3] Anandan, V., Naresh Babu, M., Vetrivel S.M., Yıldırım, C. V., & Dinesh Babu, M. (2021). Influence of graphene nanofluid on various environmental factors during turning of M42 steel. *Journal of Manufacturing Processes*, 68, 90–103.
- [4] Yıldırım, Ç. V., Kıvak, T., Erzincanlı, F., Uygur, İ., & Sarıkaya, M. (2017). Optimization of MQL Parameters Using the Taguchi Method in Milling of Waspaloy. *Gazi University Journal of Science*, 30(2), 173–186.
- [5] Yıldırım, Ç. V., Kıvak, T., & Erzincanlı, F. (2019). Influence of Different Cooling Methods on Tool Life, Wear Mechanisms and Surface Roughness in the Milling of Nickel-Based Waspaloy with WC Tools. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 44(9), 7979–7995.
- [6] Nouioua, M., Yallese, M. A., Khettabi, R., Belhadi, S., Bouhalais, M. L., & Girardin, F. (2017). Investigation of the performance of the MQL, dry, and wet turning by response surface methodology (RSM) and artificial neural network (ANN). *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 2017 93:5, 93(5), 2485–2504.
- [7] Elbah, M., Laouici, H., Benlahmidi, S., Nouioua, M., & Yallese, M. (2019). Comparative assessment of machining environments (dry, wet and MQL) in hard turning of AISI 4140 steel with CC6050 tools. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 105(5–6), 2581–2597.
- [8] Masoudi, S., Mohammad, E. J., Farshid, J., & Seyed, M. A. (2019). Comparison the effect of MQL, wet and dry turning on surface topography, cylindricity tolerance and sustainability. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 1–13.
- [9] Sarıkaya, M., Şirin, Ş., Yıldırım, Ç. V., Kıvak, T., & Gupta, M. K. (2021). Performance evaluation of whisker-reinforced ceramic tools under nano-sized solid lubricants assisted MQL turning of Co-based Haynes 25 superalloy. *Ceramics International*, 47(11), 15542–15560.
- [10] Yücel, A., Yıldırım, Ç. V., Sarıkaya, M., Şirin, Ş., Kıvak, T., Gupta, M. K., & Tomaz, İ. V. (2021). Influence of MoS₂ based nanofluid-MQL on tribological and machining characteristics in turning of AA 2024 T3 aluminum alloy. *Journal of Materials Research and Technology*, 15, 1688–1704.
- [11] Touggui, Y., Uysal, A., Emiroglu, U., Belhadi, S., & Temmar, M. (2021). Evaluation of MQL performances using various nanofluids in turning of AISI 304 stainless steel. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 115(11–12), 3983–3997.
- [12] Babu, M. N., Anandan, V., Muthukrishnan, N., & Gajendiran, M. (2018). Experimental process to evaluate the minimum quantity lubrication technique using copper nanofluids in turning process. *International Journal of Machining and Machinability of Materials*, 20(6), 497–512.
- [13] Yıldırım, Ç. V., Şirin, Ş., & Kıvak, T. (2019). Waspaloy Süper Alaşımının Frezelenmesinde Nanopartikül Katkılı Yağlamanın Takım Aşınması Üzerindeki Etkisinin Araştırılması. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 7(1), 466–476.
- [14] Iturbe, A., Hormaetxe, E., Garay, A., & Arrazola, P. J. (2016). Surface integrity analysis when machining Inconel 718 with conventional and cryogenic cooling. *Procedia CIRP*, 45, 67–70.
- [15] Yıldırım, Ç.V. (2020). Investigation of hard turning performance of eco-friendly cooling strategies: Cryogenic cooling and nanofluid based MQL. *Tribology International*, 144, 106127.
- [16] Şirin, E., & Şirin, Ş. (2021). Investigation of the performance of ecological cooling/lubrication methods in the milling of AISI 316L stainless steel. *Manufacturing Technologies and Applications*, 2(1), 75–84.
- [17] Yıldırım, Ç. V. (2019). Experimental comparison of the performance of nanofluids, cryogenic and hybrid cooling in turning of Inconel 625. *Tribology International*, 137, 366–378.
- [18] Gupta, M. K., Song, Q., Liu, Z., Sarıkaya, M., Jamil, M., Mia, M., Kushvaha, V., Singla, A. K., & Li, Z. (2020). Ecological, economical and technological perspectives based sustainability assessment in hybrid-cooling assisted machining of Ti-6Al-4 V alloy. *Sustainable Materials and Technologies*, 26, e00218.
- [19] Shokrani, A., Al-Samarrai, I., & Newman, S. T. (2019). Hybrid cryogenic MQL for improving tool life in machining of Ti-6Al-4V titanium alloy. *Journal of Manufacturing Processes*, 43, 229–243.
- [20] ISO, E. (1997). 4287–Geometrical Product Specifications (GPS)–Surface Texture: Profile Method–Terms, Definitions and Surface Texture Parameters. *International Organization for Standardization*: Geneva, Switzerland.
- [21] Yıldırım, Ç. V., Sarıkaya, M., Kıvak, T., & Şirin, Ş. (2019). 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, 443–456.
- [22] Akincioglu, S., & Şirin, Ş. (2021). Evaluation of the tribological performance of the green hBN nanofluid on the friction characteristics of AISI 316L stainless steel. *Industrial Lubrication and Tribology*, 73(9), 1176–1186.
- [23] Şirin, Ş., Yıldırım, Ç. V., Kıvak, T., & Sarıkaya, M. (2021). Performance of cryogenically treated carbide inserts under sustainable cryo-lubrication assisted milling of Inconel X750 alloy. *Sustainable Materials and Technologies*, 29, e00314.
- [24] Şirin, E., Kıvak, T., & Yıldırım, Ç. V. (2021). Effects of mono/hybrid nanofluid strategies and surfactants on machining performance in the drilling of Hastelloy X. *Tribology International*, 157, 106894.
- [25] Chuangwen, X., Jianming, D., Yuzhen, C., Huaiyuan, L., Zhicheng, S., & Jing, X. (2018). The relationships between cutting parameters, tool wear, cutting force and vibration. *Research Article Advances in Mechanical Engineering*, 10(1), 1–14.
- [26] Yıldırım, Ç. V., Kıvak, T., Sarıkaya, M., & Şirin, Ş. (2020). Evaluation of tool wear, surface roughness/topography and chip morphology when machining of Ni-based alloy 625 under MQL, cryogenic cooling and CryoMQL. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(2), 2079–2092.