

Sert Tornalama İşleminde İçten Kriyojenik Soğutmanın Yüzey Pürüzlülüğü ve Kalıntı Gerilmelere Etkileri

Hüseyin Alp Çetindağ, *Adem Çiçek ve Necati Uçak
Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü,
Ankara, Türkiye

Özet

Son zamanlarda, çevre ve insan sağlığı üzerindeki zararlı etkileri nedeniyle, geleneksel kesme sıvılarının kullanımının, sürdürülebilir imalat yöntemleri ile azaltılması veya ortadan kaldırılması amaçlanmaktadır. Bu sebeple, çevre dostu kesme koşullarının talaşlı imalat proseslerine adaptasyonu, günümüzde daha popüler hale gelmektedir. Bunlar arasında, kriyojenik işleme, özellikle kesilmesi zor malzemelerin talaşlı imalatında, işleme performansını artırmak için etkili bir yöntem olarak da nitelendirilmektedir. Bu çalışma, içten kriyojenik soğutmanın, sertleştirilmiş AISI 52100 rulman çeliğinin bir kesme hızı (200 m/dk), ilerleme (0.1 mm/dev) ve kesme derinliğinde (0.1 mm) tornalanmasında, yüzey pürüzlülüğü ve kalıntı gerilmelere etkilerini araştırmaktadır. Bu amaçla, sıvı azot (LN₂) ve karbondioksit (CO₂) iki farklı kriyojenik soğutma ortamı olarak seçilmiştir. Test sonuçları, yüzey kalitesini iyileştirmenin ve daha fazla basma gerilmeleri elde etmenin CO₂ koşulunda mümkün olduğunu göstermektedir.

Anahtar kelimeler: Sert tornalama, AISI 52100, kriyojenik işleme, kalıntı gerilme, yüzey pürüzlülüğü

The Effects of Internal Cryogenic Cooling on Surface Roughness and Residual Stresses in a Hard Turning Process

Abstract

Recently, due to detrimental effects on environment and human health, it is aimed that the usage of conventional cutting fluids is reduced or eliminated by sustainable machining techniques. Therefore, adaptation of environment-friendly cutting conditions to machining processes becomes increasingly more popular today. Among them, cryogenic machining is also characterized as an efficient method to enhance the machining performance especially when machining difficult-to-cut materials. This study investigates the effects of internal cryogenic cooling on surface roughness and residual stresses in turning of hardened AISI 52100 bearing steel at a cutting speed (200 m/min), feed (0.1 mm/rev) and depth of cut (0.1 mm). For that purpose, liquid nitrogen (LN₂) and carbon dioxide (CO₂) are selected as two different cryogenic cooling media. The test results show that it is possible to enhance surface quality and to obtain more compressive residual stresses under CO₂ condition.

Keywords: Hard turning, AISI 52100, cryogenic machining, residual stress, surface roughness

*Corresponding author: Adem Çiçek. Address: Faculty of Engineering and Natural Sciences, Department of Mechanical Engineering, Ankara Yıldırım Beyazıt University, 06010, Ankara TURKEY. E-mail address: acicek@ybu.edu.tr, Phone: +903129062295

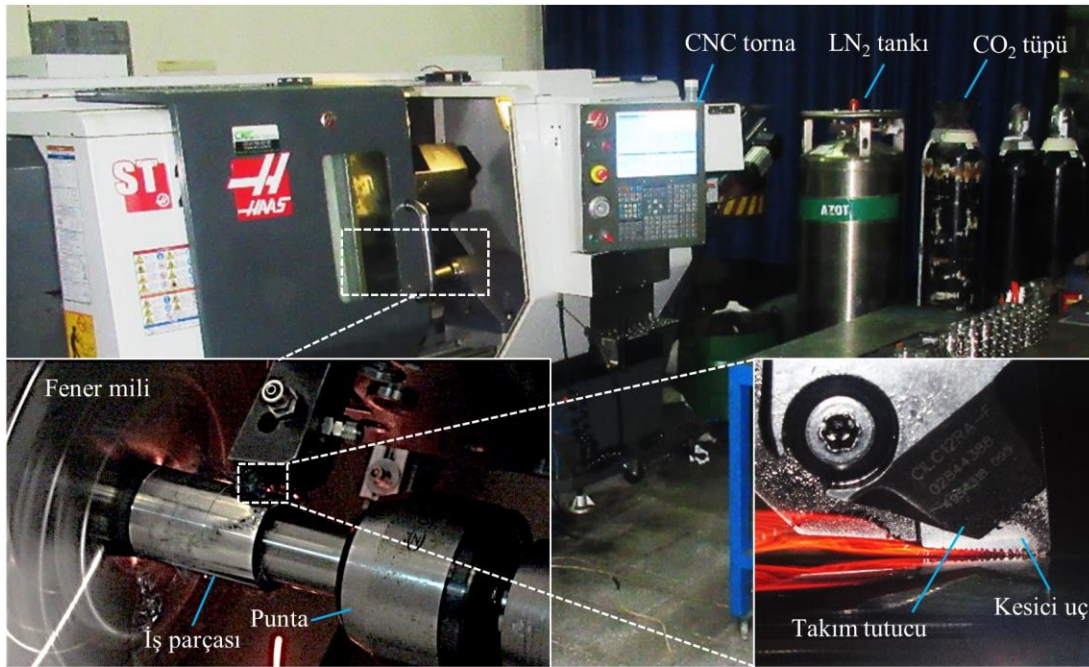
1. Giriş

Son yıllarda, gelişen teknoloji ile birlikte, metal kesme operasyonlarında daha yüksek kesme verimliliği sağlamak ve geleneksel yöntemlerin neden olduğu çevre ve insan sağlığı üzerindeki zararlı etkileri ortadan kaldırmak için sürdürülebilir imalat yöntemleri giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Bu bağlamda, geleneksel kesme sıvılarına bir alternatif olarak kriyojenik soğutucuların kullanılması, işlenmesi zor malzemelerin talaşlı imalatında takım ömrü ve işlenmiş parça kalitesinin artırılması için çevre ve insan sağlığı dostu bir yöntem olarak kabul edilmektedir [1]. Genel olarak, kriyojenik işleme uygulamalarında iki farklı kriyojen (sıvı azot ve karbondioksit) [2] ve üç farklı uygulama tekniği (ön soğutma, püskürtme soğutma ve dolaylı soğutma) [3] yaygın olarak kullanılmaktadır. Diğer kriyojenik soğutma tekniklerine kıyasla, kriyojenlerin kesici takımın talaş yüzeyi ve serbest yüzeyinden aynı anda ve doğrudan püskürtülerek gönderilmesi en etkili kriyojenik soğutma yaklaşımı olarak bilinmektedir [4]. Ayrıca, birbirinden farklı özelliklerinden dolayı, LN_2 ve CO_2 kesme bölgesine püskürtülmeleri sırasında farklı özellikler sergilemektedir. Sıvı fazda, basınçlı tüplerde muhafaza edilen CO_2 , soğutma kanallarından kesme bölgesine yüksek basınçta (yaklaşık 54 bar) püskürtülmekte, bu sırada basınç düşmesi ve faz dönüşümü (sıvı CO_2 'den katı CO_2 (%40) ve soğuk CO_2 gazına (%60)) meydana gelmektedir. Bu faz dönüşümü ve Joule-Thomson etkisi sayesinde $-78,5^{\circ}C$ 'ye kadar düşük sıcaklıklar elde edilmekte [2,5] ve kesme bölgesinde etkili soğutma sağlanabilmektedir. Diğer yandan, LN_2 daha düşük basınçta (yaklaşık 15 bar) kesme bölgesine püskürtülebilmektedir. Kaynama noktasının $-196^{\circ}C$ olması nedeniyle LN_2 , CO_2 ile karşılaştırıldığında daha fazla soğutma kapasitesine sahiptir. Bu sebeplerden dolayı, bu iki kriyojen, kesme bölgesinde farklı soğutma ve yağlama etkilerine neden olabilmektedir. Dolayısıyla bu durum, işlenmiş parçaların yüzey pürüzlülüğü ve kalıntı gerilme değerlerini önemli ölçüde etkilemektedir. Kriyojenik soğutmanın kesici takım performansı ve yüzey bütünlüğü üzerindeki olumlu etkileri, sertleştirilmiş çelikler [6], nikel alaşımları [7], titanyum alaşımları [8], paslanmaz çelikler [9] ve metal matrisli kompozitler [10] gibi işlenebilirliği zor malzemelerin talaşlı imalat çalışmalarında belirtilmiştir. Ayrıca, literatürde, kriyojenik şartların sert tornalama operasyonlarına etkilerinin araştırıldığı çeşitli çalışmalar yer almaktadır. Gharibi ve Kaynak [11], AISI 4140 çeliğinin (42 HRC) sementit karbür kesici uçlar ile işlenmesinde, CO_2 ve LN_2 'nin kesme sıcaklığına etkilerini incelemişlerdir. Kuru şartlar ile karşılaştırıldığında, CO_2 ve LN_2 'nin, kesme sıcaklığını sırasıyla %54 ve %66 azalttığını bildirmişlerdir. Navas vd. [12], kriyojenik soğutma (LN_2) uygulamasını, AISI 4150 çeliğinin (52 HRC) işlenmesi sırasında yüzey bütünlüğü açısından meydana gelen problemlerin giderilmesinde etkili bir yöntem olarak nitelendirmişlerdir. Kuru ve geleneksel kesme sıvısının kullanıldığı şartlara kıyasla, kriyojenik şartlarda daha düşük kalıntı gerilmeler ve daha yüksek yüzey sertliği elde etmişlerdir. Ancak, yüzey pürüzlülüğü değerleri, geleneksel kesme sıvısının kullanıldığı şartlarda daha düşük olmuştur. Bir başka çalışmada [13], AISI 52100 çeliğinin sert tornalanmasında, kuru şartlar ile kıyaslandığında kriyojenik soğutmanın yüzey bütünlüğünü iyileştirdiği ve böylece yorulma ömrünü de arttırdığı belirtilmiştir. LN_2 'nin sert tornalama operasyonlarındaki performans etkileri üzerine bir çok araştırma [6,12–14] olmasına rağmen CO_2 ile ilgili çalışmalar [11,15] oldukça sınırlıdır. Bu nedenle, LN_2 ile kıyaslandığında, farklı soğutma kapasitesine sahip olması, yüksek basınçta uygulanması nedeniyle daha iyi talaş kırma özelliği göstermesi ve püskürtme sırasında gaz formda olması sebebiyle daha iyi nüfus edebilmesi [16] gibi avantajları sebebiyle, sert tornalamada CO_2 'nin etkileri hakkında daha fazla araştırma yapılması gerekmektedir. Bu çalışmada, AISI 52100 çeliğinin kriyojenik sert tornalanmasında, CO_2 ve LN_2 'nin performanslarının araştırılması

amaçlanmıştır. Bu amaçla, kuru ve kriyojenik (CO_2 ve LN_2) şartlarda birtakım deneyler gerçekleştirilmiş ve deney sonuçları yüzey pürüzlülüğü ve kalıntı gerilmeler açısından değerlendirilmiştir. Çalışmanın bulguları detaylı olarak ele alınmıştır.

2. Materyal ve Yöntem

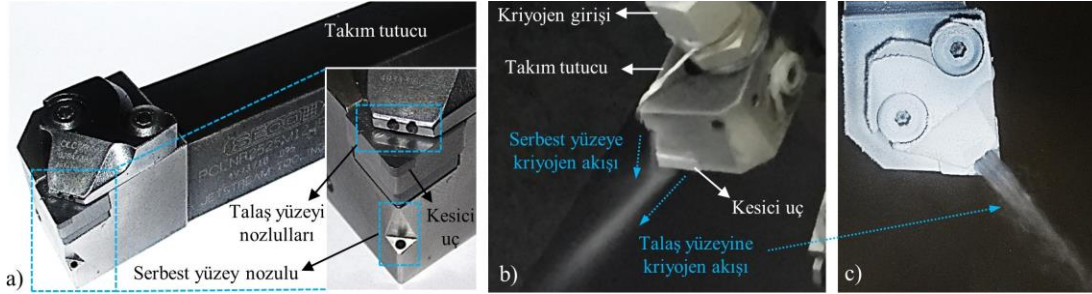
Bu çalışmada, 75 mm uzunluğunda ve 40 mm çapındaki AISI 52100 rulman çeliği malzemeleri, iş parçası olarak kullanılmıştır. Rulman çeliği numuneleri, uygun ısıtım prosedürü kullanılarak 62 HRC'ye sertleştirilmiştir. İlk olarak numuneler 845 °C'de 45 dakika boyunca östenitlenmiştir. Ardından su/tuz banyosunda su verme işlemi gerçekleştirilmiştir. Son proses olarak, iç gerilmeleri ve martenzit gevrekliğini azaltmak için numuneler, 195 °C'de 90 dakika boyunca tavlanmıştır. İş parçası malzemesinde homojen bir sertlik dağılımı elde etmek amacıyla, ısıtım işlem öncesi numunelerin ön yüzlerine 20 mm çapında aksel delikler delinmiştir. Sert tornalama deneyleri, 15 kW motor gücüne ve 4000 dev/dk maksimum devir sayısına sahip HAAS ST-20Y CNC torna tezgahında, 200 m/dk kesme hızı, 0,1 mm/dev ilerleme ve 0,1 mm kesme derinliği değerlerinde, kuru ve kriyojenik şartlarda gerçekleştirilmiştir. Deneyler sırasında, derin ve sık kriyojenik şartların yüzey pürüzlülüğü ve kalıntı gerilmelere etkilerini gözlemlemek amacıyla hem LN_2 hem de CO_2 kriyojenleri kullanılmıştır. Deney düzeneği Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Deney düzeneği.

SECO tarafından üretilen, burun yarıçapı 0,8 mm ve pah açısı ve genişliği 20°×0,1 mm olan, geleneksel CBN kesici uçlar (Secomax CBN010; CNGA 120408S-01020-L1-B) kesici takım olarak seçilmiştir. CBN kesici uçlar, titanyum karbür (TiC) bağlayıcı içerisinde ortalama tane büyüklüğü 1,5-2 µm olan, düşük CBN içeriğine (%50) sahiptir. Her deney şartı için yaklaşık 22,5

saniyelik bir işleme süresi (75,21 m kesme mesafesi) belirlenmiştir. Deneylerde, -6° talaş açısına sahip SECO (PCLNR 2525M12 JET) takım tutucu kullanılmıştır. Kriyojenik şartlarda gerçekleştirilen deneylerde, LN_2 (15 bar) ve CO_2 (54 bar) içten soğutma ile 1 mm çaplarındaki bir adet yan yüzey ve iki adet talaş yüzeyi nozullarından kesme bölgesine püskürtülmüştür (Şekil 2).



Şekil 2. a) Takım tutucu ve nozulları; b) serbest yüzeyin ve c) talaş yüzeyinin kriyojenik soğutulması.

Deneyler sonrasında, ortalama yüzey pürüzlülüğü (R_a) ve ortalama maksimum pürüzlülük yüksekliği (R_z) değerleri, Taylor Hobson Talysurf PGI 1230 profilometre ile ISO 4288'e göre ölçülmüştür. Hem aksel (ilerleme hareketine karşılık gelen) hem de çevresel (kesme hızına karşılık gelen) kalıntı gerilmeler, X-ışını kırınımı (XRD) yöntemiyle derinliğe bağlı olarak (30 μm 'ye kadar) belirlenmiştir. Gerilme ölçümleri bir Seifert XRD 3003 PTS XRD cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kullanılan XRD parametreleri Tablo 1'de yer almaktadır.

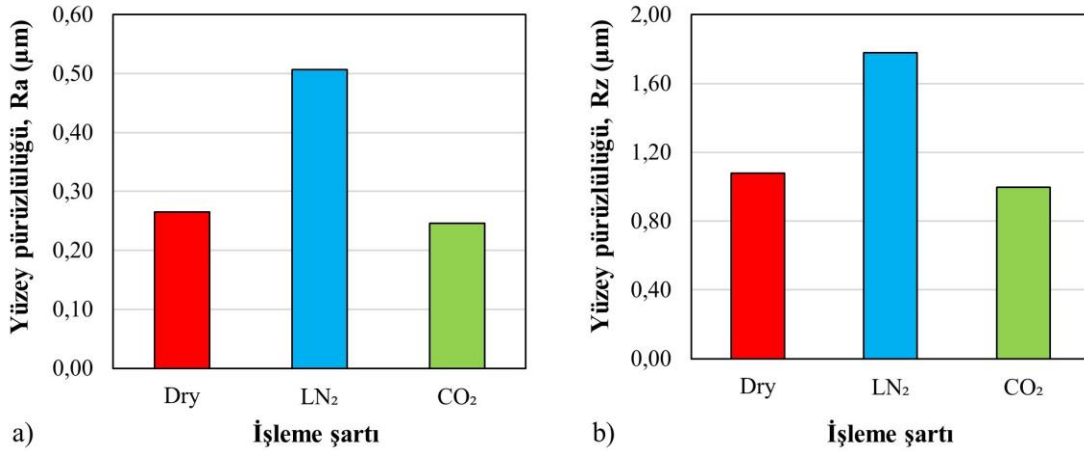
Tablo 1. XRD parametreleri.

Parametre	Değer
X-ışınımı radyasyonu	Cr-K α
Bragg açısı (2θ)	$\approx 156^\circ$
Kafes düzlemi	{2 1 1}
ψ açısı sayısı ($\pm 40^\circ$)	5
Kolimatör çapı	1,5 mm
Dedektördeki filtre tipi	Vanadyum
Ölçüm tipi	Sürekli
Algılama yöntemleri	Parabolik ve ağırlık merkezi

3. Bulgular ve Tartışma

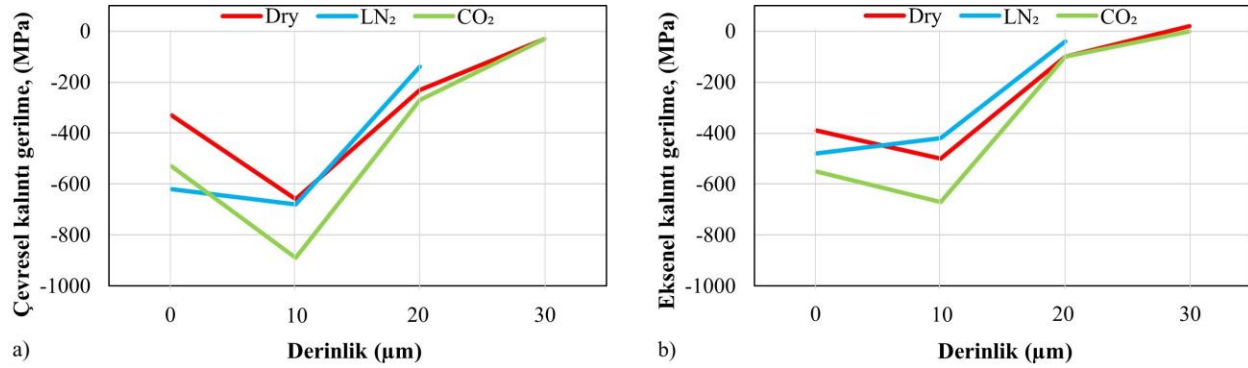
Şekil 3, farklı işleme şartlarında meydana gelen yüzey pürüzlülük değerlerini (R_a ve R_z) göstermektedir. Literatürde [13], kuru şartlar ile kıyaslandığında LN_2 ile kriyojenik soğutmanın sertleştirilmiş AISI 52100 çeliğinin işlenmesinde daha iyi yüzey pürüzlülüğü ile sonuçlandığı belirtilmesine rağmen, bu çalışmada LN_2 , R_a ve R_z değerlerinde sırasıyla yaklaşık olarak %90 ve %65 artışa sebep olmuştur. LN_2 şartında işlenmiş yüzeylerin daha pürüzlü elde edilmesinin sebebi, üç büyük püskürtme kanalına (1 mm çapında) sahip olan takım tutucunun (Şekil 2) birim zamanda daha fazla kriyojen tüketimine sebep olması ile ilişkilendirilebilir. LN_2 'ye aşırı maruz kalma, iş parçası malzemesi sertliğinde ve mukavemetinde artışa sebep olmaktadır [17]. Bu sebeple, kesme işlemi sırasında meydana gelen kesme kuvvetleri ve titreşimler artmaktadır. Sonuç olarak, LN_2 'nin

yüksek hacimde ve derin kriyojenik sıcaklıklarda ($-196\text{ }^{\circ}\text{C}$) uygulanmasının, işlenmiş yüzeylerin yüzey pürüzlülük değerlerinin artmasına neden olduğu söylenebilir. Aşırı kriyojenik soğutmanın (LN_2) işlenmiş yüzey kalitesi üzerine bazı olumsuz etkileri literatür çalışmalarında belirtilmektedir [18]. Diğer taraftan CO_2 , hem Ra hem de Rz değerlerini kuru şartlara göre ortalama %8 oranında azaltmıştır. LN_2 (-196°C) ile kıyaslandığında, orta derecede soğutma etkisi ($-78,5\text{ }^{\circ}\text{C}$) ve kesme bölgesine daha fazla nüfuz edebilme özelliği sebebiyle, CO_2 'nin yüzey pürüzlülüğü değerlerini iyileştirdiği söylenebilir.



Şekil 3. a) R_a ve b) R_z değerleri.

Şekil 4, kriyojenik şartların, kalıntı gerilme değerlerini de önemli ölçüde etkilediğini göstermektedir. Şekil 4'ten anlaşılabacağı üzere, tüm soğutma/yağlama şartlarında, hem eksenel hem de çevresel yöndeki kalıntı gerilmelerde, iş parçası yüzeylerinde daha düşük basma kalıntı gerilmeleri oluşmuş, basma kalıntı gerilmeleri $10\text{ }\mu\text{m}$ derinlikte maksimum seviyeye ulaşmış ve $20\text{ }\mu\text{m}$ ve $30\text{ }\mu\text{m}$ derinliklerde maksimum gerilmeler çekme kalıntı gerilmelerine dönüşmüştür. Genellikle tüm kesme şartlarında yüzeyde ve yüzey altında basma kalıntı gerilmelerinin oluşması, negatif etkin talaş açısının (-26°) aşırı plastik deformasyona sebep olması ile ilişkilidir. İşlenmiş yüzeyde, hem çevresel (-330 MPa) hem de eksenel (-390 MPa) yönde meydana gelen en düşük basma kalıntı gerilmeleri kuru şartta meydana gelirken, kriyojenik şartlarda birbirine benzer sonuçlar elde edilmiştir. En düşük basma kalıntı gerilmelerinin kuru şartta meydana gelmesi, sert tornalama sırasında kesme bölgesinde meydana gelen yüksek sıcaklıklar ve ardından hızlı soğuma (termal genleşme ve daralma) sonucu oluşan sıcaklık farkı ile ilişkilidir. Kriyojenik şartlar, bu sıcaklık farkını azaltmış ve işlenmiş yüzeylerde daha yüksek basma kalıntı gerilmeleri meydana getirmiştir [19]. Genel olarak, en yüksek basma kalıntı gerilmeleri CO_2 şartında elde edilmiştir. $10\text{ }\mu\text{m}$ derinlikte, hem eksenel (-670 MPa) hem de çevresel (-890 MPa) gerilmeler maksimum düzeydedir. Bu durum, CO_2 'nin yağlama ve orta derecede soğutma özellikleri ile ilişkilendirilebilir.



Şekil 4. a) Çevresel ve b) eksenel yönlerdeki kalıntı gerilme değerleri.

4. Sonuçlar

Bu çalışmada, sertleştirilmiş AISI 52100 rulman çeliğinin tornalanmasında kuru, LN₂ ve CO₂ şartlarının yüzey pürüzlülüğü ve kalıntı gerilmelere etkileri incelenmiştir. Bu araştırmanın bulguları şu şekildedir:

- En düşük yüzey pürüzlülüğü değerleri CO₂ şartında elde edilmiştir. Bu kapsamda, kuru şartlara kıyasla CO₂ şartındaki yeterli yağlama ve soğutma, Ra ve Rz değerlerini ortalama %8 düşürmüştür.
- CO₂ şartında yüzey pürüzlülüğü değerlerinde bir düşüş gözlemlenirken, LN₂ şartında, takım ve iş parçasının LN₂'ye ve derin kriyojenik sıcaklıklara aşırı maruz kalması sebebiyle işlenmiş yüzey kalitesinde önemli derecede düşüş meydana gelmiştir.
- Üç işleme şartındaki tüm kalıntı gerilme ölçümleri, genel olarak eksenel ve çevresel yönlerde basma gerilmesi olarak ölçülmüştür. Ayrıca en yüksek basma kalıntı gerilmeleri, CO₂ şartında 10 μm derinlikte elde edilmiştir.
- Termal etkilerden dolayı, yüzeydeki en düşük basma kalıntı gerilmesi kuru şartta meydana gelmiştir.

Çalışmanın deneysel bulguları, kriyojenik soğutucuların kullanımının yüzey pürüzlülüğü ve kalıntı gerilmeleri önemli ölçüde etkilediğini göstermektedir. CO₂ ile kriyojenik soğutmanın bu iki kriter açısından kuru ve LN₂ şartlarına göre iyi bir alternatif olduğu sonucuna varılabilir.

Teşekkür

Bu çalışma, Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından finansal olarak desteklenmiştir (Proje no: 4767). Ayrıca yazarlar, numune hazırlama, yüzey pürüzlülüğü ve kalıntı gerilme ölçümlerindeki desteklerinden dolayı Ortadoğu Rulman Sanayi'ne teşekkür eder.

Kaynaklar

- [1] Sadik MI, Isakson S, Malakizadi A, Nyborg L. Influence of coolant flow rate on tool life and wear development in cryogenic and wet milling of Ti-6Al-4V. *Procedia CIRP* 2016;46:91-4.
- [2] Jawahir IS, Attia H, Biermann D, Duflou J, Klocke F, Meyer D, et al. Cryogenic manufacturing processes. *CIRP Ann - Manuf Technol* 2016;65:713-36.
- [3] Dix M, Wertheim R, Schmidt G, Hochmuth C. Modeling of drilling assisted by cryogenic cooling for higher efficiency. *CIRP Ann - Manuf Technol* 2014;63:73-6.
- [4] Hong SY, Ding Y. Cooling approaches and cutting temperatures in cryogenic machining of Ti-6Al-4V. *Int J Mach Tools Manuf* 2001;10:1417-37.
- [5] MacHai C, Biermann D. Machining of β -titanium-alloy Ti-10V-2Fe-3Al under cryogenic conditions: Cooling with carbon dioxide snow. *J Mater Process Technol* 2011;6:1175-83.
- [6] Biček M, Dumont F, Courbon C, Pušavec F, Rech J, Kopač J. Cryogenic machining as an alternative turning process of normalized and hardened AISI 52100 bearing steel. *J Mater Process Technol* 2012;212:2609-18.
- [7] Pusavec F, Hamdi H, Kopac J, Jawahir IS. Surface integrity in cryogenic machining of nickel based alloy - Inconel 718. *J Mater Process Technol* 2011;211:773-83.
- [8] Revuru RS, Posinasetti NR, Vsn VR, Amrita M. Application of cutting fluids in machining of titanium alloys—a review. *Int J Adv Manuf Technol* 2017;91:2477-98.
- [9] Jerold BD, Kumar MP. Machining of AISI 316 stainless steel under carbon-di-oxide cooling. *Mater Manuf Process* 2012;10:1059-65.
- [10] Josyula SK, Narala SKR, Charan EG, Kishawy HA. Sustainable machining of metal matrix composites using liquid nitrogen. *Procedia CIRP*, 2016;40:568-73.
- [11] Kaynak Y, Gharibi A. Kesme derinliğinin sertleştirilmiş çelik malzemenin kriyojenik talaşlı imalat performansına etkisi. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University* 2019;34:581-596.
- [12] Navas VG, Fernández D, Sandá A, Sanz C, Suzon S, De Mendiola TF. Surface integrity of AISI 4150 (50CrMo4) steel turned with different types of cooling-lubrication. *Procedia CIRP* 2014;13:97-102.
- [13] Umbrello D, Micari F, Jawahir IS. The effects of cryogenic cooling on surface integrity in hard machining: A comparison with dry machining. *CIRP Ann - Manuf Technol* 2012;61:103-6.
- [14] Zurecki Z, Ghosh R, Frey JH. Investigation of white layers formed in conventional and cryogenic hard turning of steels. *International Mechanical Engineering Congress and Exposition. Manufacturing. Washington, DC, USA. November 15–21, 2003*;211-220. ASME.
- [15] Çetindağ H, Çiçek A, Uçak N. Performance of CBN inserts in CO₂ assisted hard turning of AISI 52100 bearing steel. *4th Mediterr. Sci. Eng. Congr. (IMSEC), April 25-27, 2019*.
- [16] Jerold BD, Kumar MP. Experimental comparison of carbon-dioxide and liquid nitrogen cryogenic coolants in turning of AISI 1045 steel. *Cryogenics (Guildf)* 2012;52:569-74.
- [17] Hong SY, Ding Y, Jeong W. Friction and cutting forces in cryogenic machining of Ti-6Al-4V. *Int J Mach Tools Manuf* 2001;41:2271-85.
- [18] Bordin A, Medeossi F, Ghiotti A, Bruschi S, Savio E, Facchini L, et al. Feasibility of cryogenic cooling in finishing turning of acetabular cups made of additive manufactured

- Ti6Al4V. Procedia CIRP 2016;46:615-8.
- [19] Çetindağ HA. An Investigation on the Influence of different cooling/lubrication techniques on the tool wear and surface integrity in the hard turning of AISI 52100 bearing steel. Master thesis, Ankara Yıldırım Beyazıt University; 2019.