



Investigation of the effects of cryogenic cooling on drilling performance in drilling of Inconel 718 superalloy

Necati Uçak^{*}, Adem Çiçek

Department of Mechanical Engineering, Ankara Yıldırım Beyazıt University, Ankara, 06010, Turkey

Highlights:

- Drilling of Inconel 718 superalloy under cryogenic conditions with solid carbide drills
- Temperature measurement depending on cutting depth
- Improvement of surface integrity with cryogenic conditions

Keywords:

- Inconel 718
- Cryogenic drilling
- Surface integrity
- Cutting temperature

Article Info:

Research Article
Received: 11.12.2017
Accepted: 14.05.2018

DOI:

10.17341/gazimmfd.460519

Acknowledgement:

This work was financially supported by AYBU Scientific Research Projects Commission (Project no: 3578)

Correspondence:

Author: Necati Uçak
e-mail: nucak@ybu.edu.tr
phone: +90 312 906 2333

Graphical/Tabular Abstract

Drilling of Inconel 718 which is a nickel-based superalloy is a challenging process because its superior physical and mechanical properties lead to the high thermal and mechanical loads on a twist drill. In order to obtain desired hole quality, excessive heat and forces generated during drilling must be minimized using suitable coolants and/or lubricants.

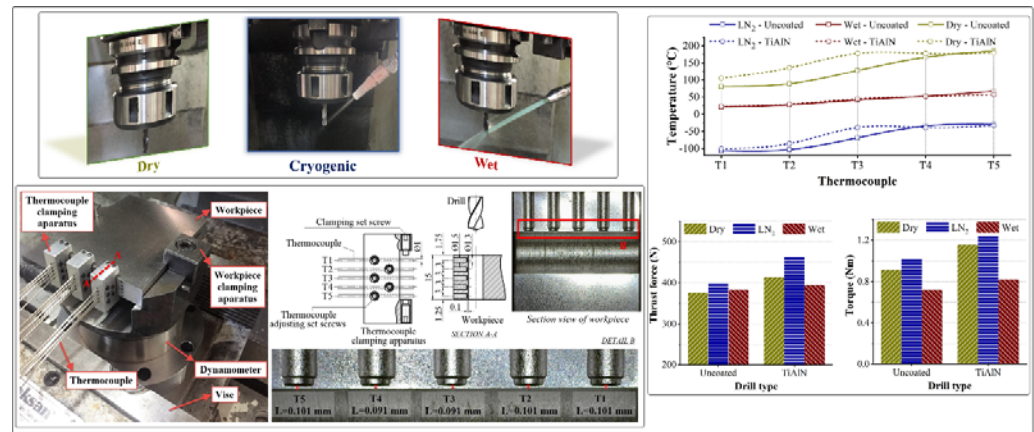


Figure A. Cutting conditions, thermocouple connection setup, and the obtained cutting temperature, torque and thrust force results.

Purpose: This study aims to investigate experimentally the effects of cryogenic cooling on cutting performance in drilling of Inconel 718.

Theory and Methods: Drilling tests were performed at a constant cutting speed (10 m/min) and a feed (0.02 mm/rev) using uncoated and TiAlN coated solid carbide twist drills under cryogenic, wet and dry conditions. The effects of cooling/lubrication conditions and coating material were examined in terms of thrust force, torque, cutting temperature, burr formation, chip formation, subsurface deformed layer thickness, microhardness change and average surface roughness.

Results: Cryogenic cooling significantly decreased the cutting temperatures. In general, lower subsurface deformed layer thickness and burr formation at the hole entrance were obtained under cryogenic conditions. However, experimental results showed that cryogenic cooling increased the thrust force and the torque values and led to rapid tool wear. Therefore, burr formation at the hole exit also increased. Good surface roughness and low tool wear were achieved under wet conditions.

Conclusion: Due to absence of any cooling/lubrication media, dry conditions led to higher cutting force, torque, and temperatures and undesirable surface quality. The test results showed that although it is possible to obtain better surface quality under cryogenic conditions, extremely low temperatures affected the cutting performance adversely. On the other hand, due to its moderate cooling and lubrication properties, wet conditions provided more stable cutting and better drilling performance.



Inconel 718 süperalaşımının delinmesinde kriyojenik soğutmanın delme performansı üzerine etkilerinin araştırılması

Necati Uçak*^{ID}, Adem Çiçek^{ID}

Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Ankara, 06010, Türkiye

Ö N E Ç İ K A N L A R

Inconel 718 süperalaşımının kriyojenik şartlarda karbür matkaplar ile delinmesi

Delme derinliğine bağlı olarak sıcaklık ölçümü

Kriyojenik şartlar ile yüzey bütünlüğünün iyileştirilmesi

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 11.12.2017

Kabul: 14.05.2018

DOI:

10.17341/gazimmfd.460519

Anahtar Kelimeler:

Inconel 718,
kriyojenik delme,
yüzey bütünlüğü,
sıcaklık

ÖZET

Bu çalışmada nikel bazlı bir süperalaşım olan Inconel 718' in delinmesinde, kriyojenik soğutmanın delme performansına etkileri deneysel olarak araştırılmıştır. Delme deneyleri, kaplamasız ve TiAlN kaplamalı karbür matkaplar kullanılarak sabit bir kesme hızı (10 m/dk) ve ilerleme (0,02 mm/dev) ile kriyojenik, geleneksel kesme sıvısı ve kuru şartlar altında gerçekleştirilmiştir. Soğutma/yağlama şartlarının ve kaplama malzemesinin etkileri, aksel kuvvet, tork, maksimum sıcaklık, çapak oluşumu, talaş oluşumu, yüzey altı deforme olmuş tabaka derinliği, mikrosertlik değişimi ve ortalama yüzey pürüzlülüğü değerleri açısından incelenmiştir. Kriyojenik soğutma, sıcaklık değerlerini önemli derecede düşürmüştür. Genel olarak kriyojenik şartlarda daha düşük yüzey altı deforme olmuş tabaka kalınlığı ve delik girişinde daha az çapak oluşumu elde edilmiştir. Ancak deney sonuçları kriyojenik soğutmanın aksel kuvvet ve tork değerlerini arttırdığını ve hızlı takım aşınmasına sebep olduğunu göstermiştir. Buna bağlı olarak çıkış çapak yükseklikleri de artmıştır. İyi yüzey pürüzlülüğü değerleri ve düşük takım aşınması kesme sıvısı kullanımıyla elde edilmiştir.

Investigation of the effects of cryogenic cooling on drilling performance in drilling of Inconel 718 superalloy

H I G H L I G H T S

Drilling of Inconel 718 superalloy under cryogenic conditions with solid carbide drills

Temperature measurement depending on drilling depth

Improvement of surface integrity with cryogenic conditions

Article Info

Research Article

Received: 11.12.2017

Accepted: 14.05.2018

DOI:

10.17341/gazimmfd.460519

Keywords:

Inconel 718,
cryogenic drilling,
surface integrity,
temperature

ABSTRACT

In this study, the effects of cryogenic cooling on drilling performance in drilling of Inconel 718 which is a nickel-based superalloy were investigated experimentally. Drilling tests were performed at a constant cutting speed (10 m/min) and a feed (0.02 mm/rev) using uncoated and TiAlN coated solid carbide twist drills under cryogenic, traditional cutting fluid, and dry conditions. The effects of cooling/lubrication conditions and coating material were examined in terms of thrust force, torque, maximum temperature, burr formation, chip formation, subsurface deformed layer thickness, microhardness change and average surface roughness values. Cryogenic cooling significantly decreased the temperature values. In general, lower subsurface deformed layer thickness and burr formation at the hole entrance were obtained under cryogenic conditions. However, experimental results showed that cryogenic cooling increased the thrust force and the torque values and led to rapid tool wear. Therefore, burr formation at the hole exit also increased. Good surface roughness and low tool wear were achieved with the use of cutting fluid.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Havacılık sanayinde zorlu çalışma koşullarına maruz kalan ve türbinler için geliştirilen Inconel 718, endüstriyel alanda tüm nikel bazlı süperalaşım arasında en yaygın kullanılanıdır. [1]. Ayrıca, düşük ve yüksek çalışma sıcaklık aralıklarında (-250°C ila 700°C) [2] sağladığı üstün fiziksel ve mekanik özellikleri sayesinde havacılık [3], uzay [4], petrol, nükleer enerji, otomotiv, kimyasal ve tıbbi ürünler endüstrilerinde de sıkça tercih edilmektedir [1]. Diğer taraftan, Inconel 718 barındırdığı fiziksel ve mekanik özellikleri nedeniyle plastik deformasyonu zor olan malzemelerden biridir. Yüksek mukavemet ve sıcak sertlik [5], yüksek pekleşme eğilimi, düşük ısı iletkenlik (11,4 W/mK) [6], bazı kesici takım malzemelerine kimyasal ilgi [5] ve yüksek süneklik gibi özellikleri nedeniyle Inconel 718'in talaşlı imalatı sırasında düşük takım ömrü, istenmeyen yüzey kalitesi [7] ve yüksek işleme maliyetleri gibi problemler ile karşılaşmaktadır. Bu süperalaşımın işlenebilirliğinin iyileştirilmesine yönelik çalışmalar günümüzde popüler araştırma konuları arasındadır.

İşlenmesi zor mühendislik malzemelerinin talaşlı imalat süreçlerinde işleme maliyetlerinin azaltılmasının yanı sıra ürün kalitesinin artırılması en temel amaçtır [8]. Günümüzde talaşlı imalat süreçlerinde genel eğilim kuru kesme olmasına rağmen, Inconel 718 gibi işlenmesi zor olan malzemelerde kuru şartlardaki kötü ürün kalitesi ve kısa takım ömrü nedeniyle kesme sıvılarının kullanılması tercih sebebidir. Bu nedenle, işleme performansını artırıcı bir etken olarak farklı soğutucu/yağlayıcılar çeşitli uygulama yöntemleri ile talaşlı imalat süreçlerinde sıklıkla tercih edilmektedir. Kesme sıvılarının kullanımı, kesme bölgesinde oluşan ısının azaltılmasına, kesici takım-ış parçası ve kesici takım-talaş yüzeyleri arasındaki sürtünmenin azaltılmasına, kesme bölgesinden talaşların uzaklaştırılmasına, ürün kalitesinin artırılmasına ve kesme kuvvetlerinin azaltılmasına yardımcı olmaktadır [9]. Ancak, geleneksel kesme sıvılarının çevre ve insan sağlığı açısından bazı olumsuzluklara yol açtığı da bir gerçektir [10]. Delik delme süreçlerinde, düşük ve yüksek basınçta geleneksel kesme sıvısı [11], minimum miktarda yağlama [12] ve hibrit soğutma/yağlama sistemleri [13] gibi farklı soğutma/yağlama yöntemleri araştırmacılar tarafından kesme performansının artırılması amacı ile araştırılmaktadır. Bu amaçla kullanılmakta olan yöntemlerden bir diğeri ise kriyojenik soğutmadır [14]. Sıvı azot (LN₂) kriyojenik soğutma operasyonlarında en yaygın kullanılan kriyojendir [15]. Atmosferde çok miktarda bulunan azot gazı (%78) (erime noktası: -210°C, kaynama noktası: -195,80°C), havadan daha hafif olduğu için kesme bölgesine uygulandıktan hemen sonra buharlaşma ve atmosfere dağılma eğiliminde olduğundan geleneksel yöntemlerdeki soğutma/yağlama maddeleri gibi işleme operasyonlarında kullanıldıktan sonra herhangi bir kalıntı bırakmamaktadır. Bu sebeple kriyojenik soğutma yöntemi geleneksel yöntemler ile karşılaştırıldığında çevre dostu bir uygulama olarak bilinmektedir [16]. Çevre dostu ve insan sağlığına zararı olmayan özelliklerinin yanında kriyojenik

soğutmanın, talaşlı imalatı zor mühendislik malzemelerinin işlenebilirliğini artırıcı etkileri literatürdeki birçok çalışmada yer almaktadır. Ezugwu [17], kriyojenik işleme ile kesme sıcaklıklarının düşürülmesinin, işlenmesi zor mühendislik malzemelerinin talaşlı imalatında daha efektif ve ekonomik işlemenin sağlanabileceğini belirtmiştir. Kaynak vd. [18], kuru, kesme sıvısı ve minimum miktarda yağlama ile karşılaştırıldığında kriyojenik soğutmayı, talaşlı imalat operasyonlarında yüzey bütünlüğünü iyileştirmek için en uygun işleme ortamı olarak tanımlamışlardır. Bir derleme çalışmasında [19] ise, kuru ve kesme sıvısının kullanıldığı işleme koşulları ile karşılaştırıldığında, kriyojenik soğutmanın daha az boyutsal hata, daha iyi işlenmiş yüzey kalitesi ve takım ömrü sağlayabileceği belirtilmiştir. Ancak kriyojenik şartların malzeme mukavemetinin ve sertliğinin artmasına neden olduğu ve bu durumun kesme kuvvetlerinin artması ile sonuçlandığı bildirilmiştir. Yazarlar bu konuda gerçekleştirilen çoğu çalışmanın tornalama operasyonları üzerine yoğunlaştığını ve kriyojenik soğutmanın delme operasyonlarındaki etkilerinin araştırılmasına ihtiyaç duyulduğunu vurgulamışlardır.

Ahmed ve Kumar [20], işlenebilirliği zor malzemelerden biri olan Ti6Al4V alaşımının kriyojenik (LN₂) şartlar altında delinebilirliği üzerine gerçekleştirdikleri çalışmalarında, kesme sıvısının kullanıldığı işleme şartları ile kıyaslandığında kriyojenik soğutma ile %28-61 arasında daha düşük kesme sıcaklıkları ve daha iyi yüzey kalitesi elde edildiğini bildirmişlerdir. Biermann ve Hartmann [21], 34CrNiMo6 ve AlMgSi malzemelerinin delinmesinde kriyojenik soğutmanın (CO₂) çapak oluşumuna etkilerini araştırmışlardır. Kriyojenik soğutma ile kesme sıcaklıklarının düşürülmesinin malzemeyi gevreklettiği, sünekliği azalan iş parçası malzemesinde daha az çapak oluşumunun gerçekleştiği tespit edilmiştir. Bir başka çalışmada ise [22], GLARE kompozit malzemelerin delinmesinde delik kalitesi kuru, minimum miktarda yağlama ve kriyojenik şartlar altında araştırılmıştır. Kriyojenik şartlarda kuru şartlar ile kıyaslandığında delik çıkışındaki çapak yüksekliklerinde %47'ye varan düşüş gözlemlenmiştir. Xia vd. [23] CFRP kompozit malzemelerin delinmesinde kriyojenik soğutmanın delme performansına etkilerini incelemişlerdir. Kriyojenik soğutma ile daha iyi takım ömrü ve delik kalitesi elde edilirken kriyojenik şartlar eksenel kuvvet ve tork değerlerinin artmasına sebep olmuştur. Inconel 718'in TiAlN karbür matkaplar kullanılarak delinmesinde kesme sıvısı ve kriyojenik kullanılan işleme şartlarının termo-mekanik etkileri ve işleme performansı Outeiro vd. [23] tarafından incelenmiştir. Deney sonuçları kriyojenik soğutmanın eksenel kuvvet ve tork değerlerini arttırdığını ve takım ömrünü önemli ölçüde azalttığını göstermiştir. Kriyojenik delme üzerine gerçekleştirilen bu çalışmalar, kriyojenik soğutma uygulamaları ile delme operasyonlarında daha iyi yüzey kalitesi, daha az çapak oluşumu, vb. delik kalitesini artırıcı sonuçların elde edilebildiğini, ancak yüksek eksenel kuvvet ve tork değerleri ve düşük takım ömrü gibi sonuçların da oluşabildiğini göstermektedir. Bu kapsamda, çevre dostu ve

performans artırıcı bir yöntem olan kriyojenik soğutmanın özellikle Inconel 718 gibi işlenebilirliği zor malzemelerin delinmesindeki etkilerinin daha kapsamlı bir şekilde araştırılması bir ihtiyaçtır. Ayrıca, literatürde bulunan performans kıyaslama yöntemleri incelendiğinde, farklı talaşlı imalat operasyonlarında kriyojenik soğutmanın yüzey altı deforme olmuş tabaka kalınlığının azalmasında [24] ve bu bölgedeki mikrosertlik değerlerinin düşmesinde [25] olumlu etkilerini gösteren çalışmalar yer almasına rağmen, delme operasyonlarında kriyojenik soğutmanın yüzey altı deforme olmuş tabaka kalınlığı üzerine etkileri üzerine yapılan çalışmaların [26] oldukça az olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca, kriyojenik delme şartlarının uygulanabilirliğinin belirlenmesi amacıyla, kesme sıvısının kullanıldığı şartlar ve kuru şartlara göre performans kıyaslaması ortaya konulmalıdır. Bu açıdan, şimdiye kadar gerçekleştirilen kriyojenik delme çalışmalarından farklı olarak, 10 m/dk kesme hızında yüzey bütünlüğünün diğer performans kriterlerine (eksenel kuvvet, tork, maksimum sıcaklık, takım aşınması ve talaş oluşumu) bağlı olarak değerlendirilmesi yapılmıştır.

Bu çalışmada, Inconel 718 süperalaşımının kaplamasız ve TiAlN kaplamalı sementit karbür matkaplar kullanılarak delinmesinde kriyojenik soğutmanın delme performansı üzerine etkileri deneysel olarak araştırılmıştır. Farklı işleme şartlarında meydana gelen ekstenel kuvvet, tork, sıcaklık, yüzey bütünlüğü (yüzey altı mikroyapılar ve mikrosertlik değerlerinde meydana gelen değişimler ve ortalama yüzey pürüzlülük değerleri), delik girişi ve çıkışlarındaki çapak yüksekliği değerleri ve talaş oluşumu, performans değerlendirme kriterleri olarak belirlenmiştir. Elde edilen bulgular kesme sıvısı kullanımıyla ve kuru şartlarda gerçekleştirilen deneyler ile kıyaslanarak değerlendirilmiştir. Bu çalışmanın öncelikli amacı, kriyojenik soğutmanın Inconel 718'in delinebilirliğine etkilerinin kapsamlı olarak incelenmesidir.

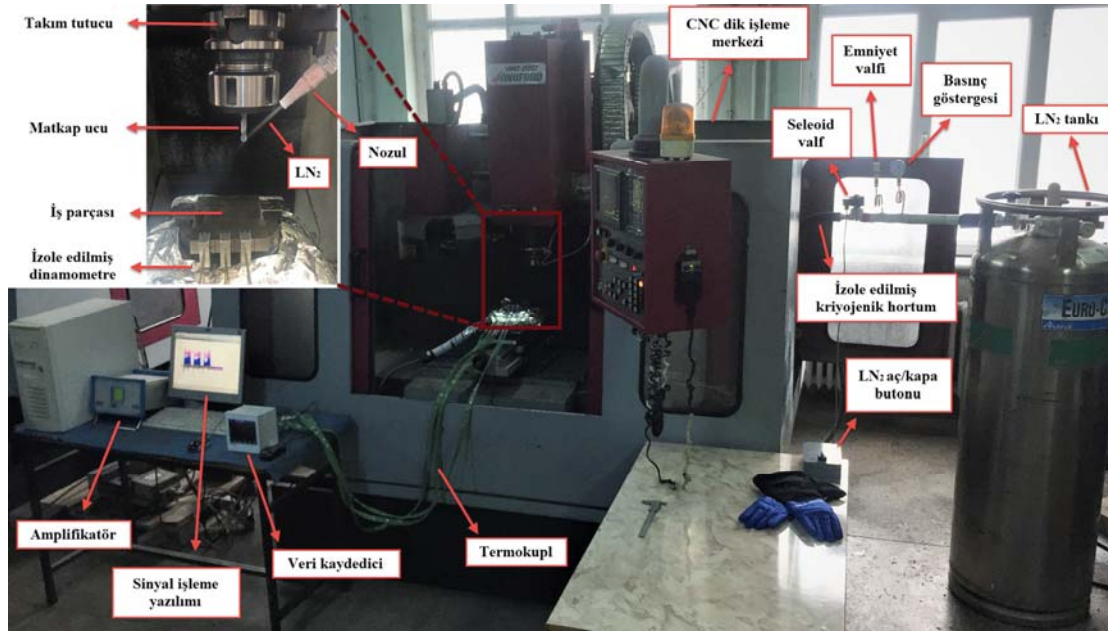
2. MALZEME VE YÖNTEM (MATERIAL AND METHOD)

Deneyler, kuru, kriyojenik ve kesme sıvısının kullanıldığı koşullar altında, 7,5 kW gücünde ve maksimum fener mili hızı 6000 dev/dak olan Johnford VMC-550 tipi CNC dik işleme merkezinde gerçekleştirilmiştir. 100 mm × 80 mm × 15 mm boyutlarındaki sıcak haddelenmiş ve tavlanmış, 90,5 HRB sertliğe sahip, kimyasal bileşimi %53,66 Ni, %18,41 Cr, %17,90 Fe, %4,92 Nb, %2,87 Mo, %0,96 Ti, %0,34 Co, %0,13 Cu, %0,09 Si, %0,08 Mn, %0,03 C (ağırlık yüzdeleri) olan Inconel 718, iş parçası malzemesi olarak seçilmiştir. Deney sonuçlarını etkileyebilecek yüzey kusurlarını ortadan kaldırmak için iş parçası malzemesinin tüm yüzeyleri hassas bir şekilde taşlanmıştır. Kesici takım olarak, Gühring firmasından temin edilen, 5 mm çapında kaplamasız ve TiAlN kaplamalı, 140° uç açısı, 30° helis açısına sahip ve tam boyu 66 mm olan sementit karbür matkaplar kullanılmıştır. Deneylerde, iş parçası malzemesi üzerine derinliği 15 mm olan boydan boya delikler delinmiştir. Delme deneyleri, 10 m/dk kesme hızı ve 0,02 mm/dev ilerleme değerlerinde gerçekleştirilmiştir. Her deney için

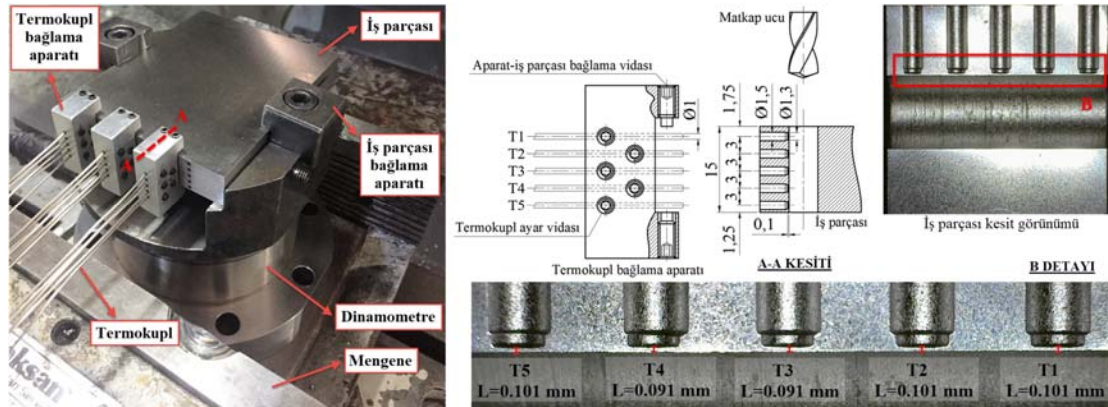
yeni bir matkap kullanılmıştır. Doğru ve güvenilir sonuçlar elde edebilmek için her deney koşulunda üç delik delinmiştir.

Kesme sıvısının kullanıldığı şartlar altındaki delme deneyleri, yarı sentetik kesme yağı ve su emülsiyonunun (%5 kesme yağı ve %95 su) kesme bölgesine uygulanması ile gerçekleştirilmiştir. Kriyojenik delme deneyleri ise, soğutucu olarak LN₂ kullanıldığı bir kriyojenik soğutma düzeneği yardımı ile gerçekleştirilmiştir. Delme sırasında LN₂ akışını sabit tutmak, kriyojenik soğutma sisteminde basıncı izlemek ve kontrol etmek için basınç göstergesi ve emniyet valfi kullanılmıştır. Ayrıca, kullanım kolaylığı sağlamak için kriyojenik soğutma düzeneğinde selenoid valfli LN₂ aç/kapa kontrol sistemi kullanılmıştır. LN₂, 2 mm çapındaki bir nozul vasıtasıyla kesme bölgesine 1,5 bar basınç ile püskürtülmüştür. Nozul, fener miline sabitlenerek nozul ve kesici takımın eşzamanlı hareketi sağlanmıştır. Meydana gelen ekstenel kuvvet ve tork değerleri, Kistler 9272 tipi dinamometre yardımıyla tüm kesme koşullarında ölçülmüştür. Deneyler sırasında, tüm delme operasyonlarında aynı kesme koşulunu sağlayabilmek ve burulma etkisini ortadan kaldırmak amacıyla, takım tutucu ve matkap ucu arasındaki mesafe 30 mm'ye sabitlenmiştir. Meydana gelen maksimum sıcaklıkların ölçümleri, iş parçası malzemesinin kalınlığı boyunca beş farklı noktadan bir veri kaydedici (E-PR-110, Elimko) yardımı ile gerçekleştirilmiştir. Sıcaklık ölçümlerinde, 1 mm çapında, -200°C – 1200°C sıcaklık ölçüm aralığına sahip, K tipi (NiCr-Ni) termokupl (ısı çifti) kullanılmıştır. Deneyler sırasında, özellikle kriyojenik şartlarda (-196°C), termokupplarda herhangi bir deformasyon oluşmaması ve daha doğru sonuçlar elde edilebilmesi için termokuppları, Inconel 600 koruyucu kılıflı olarak kullanılmıştır. Kesme kuvveti, sıcaklık ölçümü ve kriyojenik soğutma ekipmanlarının da yer aldığı deney düzeneği Şekil 1'de yer almaktadır.

Delme işlemi sırasında, delik yüzeyine en yakın konumda (~0,1 mm) iş parçası üzerinden sıcaklık ölçümlerinin sağlıklı bir şekilde gerçekleştirilebilmesi için, bir termokupl bağlama aparatı tasarlanıp imal edilerek, beş termokupl uygun bir şekilde iş parçasına sabitlenmiştir. Termokupl bağlama aparatı, aparat-ış parçası bağlama vidaları ile iş parçasına sabitlenmiştir. Termokuppları deneyler sırasında sabit bir şekilde kalmaları, bağlama aparatı üzerindeki termokupl ayar vidaları ile sağlanmıştır. Şekil 2, termokuppları termokupl bağlantı aparatına ve iş parçasına bağlantı şekillerini ve iş parçasındaki termokupl konumlarını göstermektedir. Termokuppları birbirlerine eşit mesafede (3 mm) ve delik girişinden 1,75 mm ve delik çıkışından 1,25 mm mesafede konumlandırılmışlardır. Bu şekilde, delme operasyonu esnasında meydana gelen sıcaklık değişimleri delinen delik boyunca beş farklı noktadan ölçülmüştür. Deneylerde, T1'den T5'e kadar isimlendirilmiş termokuppları, delinmiş delik yüzeyinden yaklaşık 0,1 mm mesafede konumlandırılmışlardır. İş parçası yan yüzeyine 1,5 mm çapındaki termokupl delikleri 120° uç açılı TiAlN kaplamalı karbür matkap uçları kullanılarak delinmiştir. Termokuppları ile doğru ve güvenilir sıcaklık ölçümleri elde



Şekil 1. Deney düzeneği (Experimental setup)



Şekil 2. Sıcaklık ölçümlerinde kullanılan termokupl bağlantı düzeneği
(Thermocouple connection setup used for temperature measurements)

edebilmek için termokupl ile iş parçasının tam olarak temas halinde olması önem arz etmektedir [27]. Ayrıca, iş parçası içerisine konumlandırılan termokupllar ile gerçekleştirilen sıcaklık ölçümlerinde, kesme bölgesinde meydana gelen sıcaklığa en yakın değerin ölçülebilmesi için termokupl-delik yüzeyleri arasındaki mesafenin en az kalınlıkta olması ve sağlıklı bir kıyaslama yapabilmek için tüm deney şartlarında eşit olması dikkate alınmalıdır. Bu amaçla, 1,5 mm çapındaki delikler delindikten sonra 1,3 mm çapında, TiAlN kaplamalı karbür parmak freze çakısı kullanılarak delik dipleri düzleştirilmiştir. Ayrıca, termokupl-delik yüzeyi arası mesafenin (yaklaşık 0,1 mm) doğruluğu Şekil 2'de gösterildiği gibi bir dijital mikroskop (Dino-Lite AM4113T) yardımıyla teyit edilmiştir.

Kesme koşullarının yüzey kalitesine etkilerini tespit etmek için, her bir deney koşulundaki işlenmiş yüzeylerin pürüzlülük değerleri Mitutoyo SurfTest SJ-301 profilometre

kullanılarak belirlenmiştir. Bu amaçla iş parçası, CNC tel erozyon tezgâhı yardımı ile delik eksenine paralel olacak şekilde iki parçaya ayrılmıştır. Tel erozyon ile kesilen parçaların farklı konumlarından üçer ölçüm alınmış ve bu altı ölçümün ortalama değeri ilgili deney şartının yüzey pürüzlülük değeri olarak değerlendirilmiştir. Her ölçüm için sadece ortalama yüzey pürüzlülüğü değeri (Ra) dikkate alınmıştır. Ayrıca, her bir kesme şartında işlenmiş yüzey altında meydana gelen mikroyapı ve mikrosertlik değişimleri araştırılmıştır. Numunelerin optik mikroskop incelemeleri için metalografik işlemler gerçekleştirilmiştir. Kesme, zımparalama ve parlatma işlemleri sonrası numuneler, 100 ml hidroklorik asit, 100 ml su ve 40 ml hidrojen peroksit %30 çözeltisinde 5 s boyunca dağlanmış ve mikroyapılar optik mikroskop altında incelenmiştir. İşlenmiş yüzey altında meydana gelen mikrosertlik değişimleri HMV-G21 Shimadzu Vickers sertlik ölçme cihazı yardımı ile ölçülmüştür. Ölçümlerde 50 g yük iş parçası malzemesine 10

s boyunca uygulanmıştır. İlk ölçüm, işlenmiş yüzeyden 40 μm mesafeden alınmış ve her bir ölçüm arası 40 μm olmak üzere toplamda on adet sertlik ölçümü gerçekleştirilmiştir. Ölçümler delik girişi, ortası ve çıkışından alınmış, ölçümlerin ortalama değeri mikrosertlik değeri olarak belirlenmiştir.

Her bir deney şartı için delik girişi ve çıkışlarında meydana gelen çapak yükseklikleri bir dijital mikroskop (Dino-Lite AM4113T) yardımı ile ölçülmüştür. Dilimlenen iş parçasının her iki tarafından da altı adet ölçüm alınmış ve bu ölçümlerin ortalaması çapak yüksekliği olarak belirlenmiştir. Bu yöntem hem giriş hem de çıkış çapak yüksekliklerinin ölçülmesinde uygulanmıştır. Dijital mikroskop ile elde edilen örnek bir çapak yüksekliği ölçüm fotoğrafı Şekil 3'te yer almaktadır.

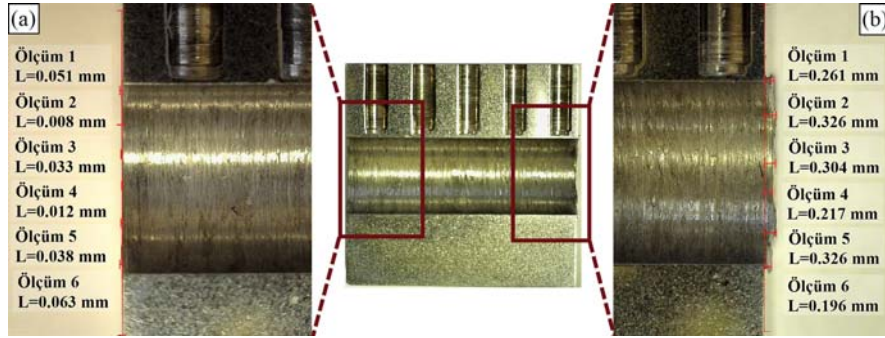
3. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

3.1. Eksenel Kuvvet ve Tork (Thrust Force and Torque)

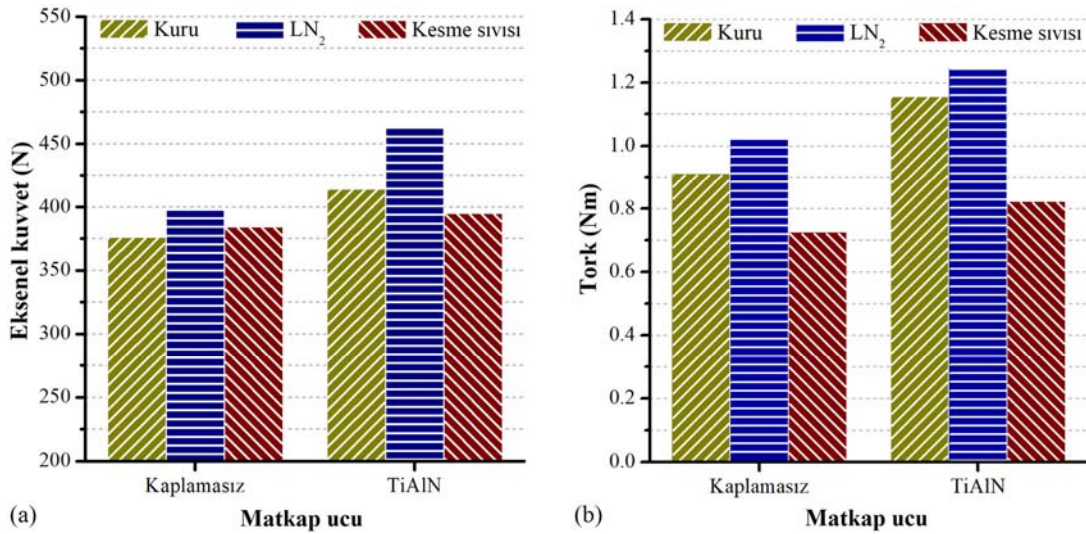
Şekil 4, farklı işleme koşullarındaki ortalama eksenel kuvvet (Şekil 4a) ve tork (Şekil 4b) değerlerini göstermektedir. Kriyojenik şartlar kesme kuvvetlerinde %3–10 aralığında bir artışa neden olmuştur. Düşük sıcaklıklarda (-196°C) gerçekleştirilen kriyojenik soğutma uygulaması iş parçası

malzemesinin gevrekleşmesine ve dolayısı ile mukavemetinin artmasına neden olmaktadır. Bu sebeple, kriyojenik şartlarda kesme kuvvetleri artma eğilimi göstermektedir [28]. Bazı literatür çalışmalarında [20] kriyojenik delmenin eksenel kuvvetin düşmesine sebep olduğu belirtilmiş olsa da, deneysel bulgular kriyojenik şartların Inconel 718 süperalaşımını gevrekleştirerek plastik deformasyona karşı malzeme direncinin artmasına sebep olduğunu ve sonuç olarak eksenel kuvveti artırdığını göstermektedir. Genel olarak kesme sıvısının kullanıldığı şartlarda daha düşük eksenel kuvvet değerleri gözlemlenmiştir. Kaplama malzemesinin kullanımı eksenel kuvvetlerin %3–16 aralığında artmasına neden olmuştur. Bu durum kaplama malzemesinin kesici kenar yarıçapını artırması ile açıklanabilir.

Kriyojenik soğutma, tork değerlerinde %8–51 aralığında bir artışa sebep olmuştur (Şekil 4b). Eksenel kuvvet değerlerinin açıklanmasında bahsedilen iş parçası malzemesinin kriyojenik şartlar altında daha zor plastik deformasyon davranışı göstermesinin tork değerlerinin de artmasına sebep olduğu söylenebilir. Kuru şartlar altında kriyojenik şartlara yakın tork değerleri elde edilirken, kesme sıvısının kullanıldığı şartlarda düşük tork değerleri gözlemlenmiştir. Kesme sıvısının kullanıldığı şartlardaki yağlama ve soğutma etkisinin kesici takım-talaş ve kesici takım-iş parçası ara



Şekil 3. a) Delik girişi ve b) delik çıkışı çapak yüksekliği ölçümleri (a) Hole entrance and b) hole exit burr height measurements)



Şekil 4. a) Eksenel kuvvet ve b) tork değerleri (a) Thrust force and (b) torque values)

yüzeyleri arasında sürtünme ve kesici kenarda yığıntı talaş (YT) oluşumunu azaltarak daha düşük tork değerlerinin elde edilmesini sağladığı söylenebilir. Diğer taraftan, TiAlN kaplamalı matkaplar kullanılarak gerçekleştirilen deneylerde %14–22 arasında daha yüksek tork değerleri elde edilmiştir. Bu durum da kaplama malzemesinin kullanımı ile kesici kenar yarıçapının artmasına atfedilebilir.

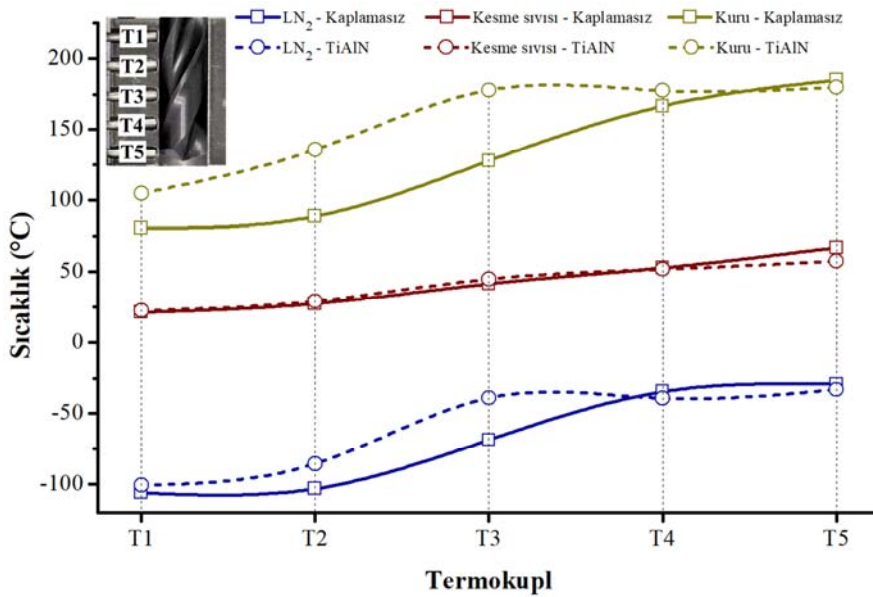
3.2. Maksimum Sıcaklık (Maximum Temperature)

Şekil 5, farklı işleme şartlarında, her bir termokupl pozisyonunda kaydedilen en yüksek sıcak değerlerini göstermektedir. Beklendiği üzere [29], kesme derinliğinin artması ile tüm işleme koşullarında meydana gelen sıcaklık değerleri yükselmiştir. Diğer koşullar ile kıyaslandığında kriyojenik koşullar sıcaklık değerlerini önemli ölçüde düşürmüştür. Termokupullar ile kaydedilen en yüksek sıcaklık değerleri; kriyojenik şartlarda -31°C , kesme sıvısının kullanıldığı şartlarda $62,25^{\circ}\text{C}$ ve kuru şartlarda ise $182,85^{\circ}\text{C}$ şeklindedir. Herhangi bir soğutma/yağlama maddesinin kullanılmaması, kuru şartlar altında yüksek sıcaklıklarının oluşmasına sebep olmuştur. Kesme sıvısının kullanıldığı koşullarda kaplamalı ve kaplamasız matkaplarla ölçülen sıcak eğrileri oldukça benzer bir eğilim göstermiştir. Bu durum kaplamalı ve kaplamasız matkabın düzenli ve düşük düzeyde aşınması ile ilişkilendirilmiştir (Şekil 10a). Diğer taraftan kuru ve kriyojenik şartlarda kesme sıvısının kullanıldığı şartlara göre derinliğe bağlı olarak daha yüksek sıcaklık artışları gerçekleşmiştir. Bu durum da bu şartlardaki hızlı takım aşınması ile ilişkilendirilmiştir. Şekil 5'ten de görülebileceği üzere genel olarak kaplamasız matkaplar ile gerçekleştirilen deneylerde kaplamalı ile kıyaslandığında T4 termokupl konumuna kadar daha düşük sıcaklıklar kaydedilmiştir. Bu durum, kaplamasız matkapların kaplama malzemesinden (TiAlN) daha yüksek termal iletkenliğe sahip olması ve ısıyı kesme bölgesinden daha kolay ve çabuk transfer etmesi ile açıklanabilir. Bu konumdan sonra daha

düşük sıcaklıklar kaplamalı matkap ile elde edilmiştir. Bu durum ise kaplamalı matkabın aşınma direncine atfedilmiştir. Literatür incelendiğinde kriyojenik delme çalışmalarında soğutmanın takım içerisinde [30] veya bu çalışmada olduğu gibi dışarıdan püskürtme yöntemi ile [20] uygulanabildiği görülmektedir. Delme operasyonlarında belirli bir delme derinliğinden sonra soğutucu/yağlayıcı maddenin kesme bölgesine ulaşmasındaki zorluklardan dolayı etkisini yitirdiği, bu sebeple içten soğutma/yağlama yöntemlerinin tercih edildiği bilinmektedir. Fakat bu çalışmada LN_2 'nin dışarıdan püskürtülmesi ile de meydana gelen maksimum sıcaklıkların önemli ölçüde azaldığı gözlemlenmiştir (Şekil 5). Bu durum kriyojenik şartlarda dıştan soğutmanın maksimum sıcaklıkları azaltmadaki etkisini göstermektedir.

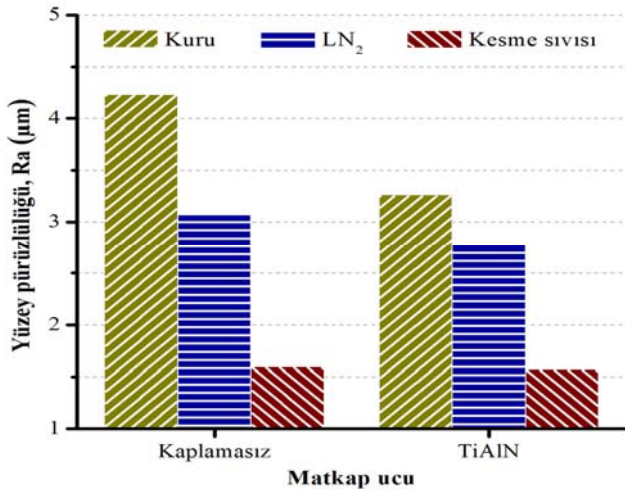
3.3. Yüzey Pürüzlülüğü (Surface Roughness)

Şekil 6, farklı işleme koşullarındaki Ra değerlerini göstermektedir. En düşük değerler kesme sıvısının kullanıldığı şartlar altında %178 – 265 aralığında bir iyileşme ile elde edilmiştir. Bu durum, kesme sıvısının kullanımıyla, takım-talaş ve takım-iş parçası ara yüzeylerinde yeterli soğutma ve yağlama etkileri ile açıklanabilir [31]. Kriyojenik delme koşullarında kuru şartlara göre daha iyi Ra değerleri elde edilmesine rağmen kesme sıvısının kullanıldığı şartlarda olduğu kadar pürüzsüz yüzeyler elde edilememiştir. Bu nedenle, kriyojenik koşullardaki etkin soğutma yerine kesme sıvısının kullanımıyla yağlama ve orta düzey soğutma kombinasyonunun, Inconel 718 gibi sünek ve yapışma eğilimi yüksek olan bir malzemenin delinmesinde daha iyi Ra değerleri elde etmek için öncelikli olarak düşünülmesi gerektiği sonucuna varılabilir. Kaplama malzemesi, tüm kesme koşullarında yüzey pürüzlülüğünü iyileştirmiştir. Deney sonuçlarına göre, TiAlN kaplama Ra değerlerini %2 –23 arasında azaltmıştır. Kesici takımlarda kaplama



Şekil 5. Maksimum sıcaklık değerleri (Maximum temperature values)

malzemesinin kullanım amaçlarından biri, kesici takımın aşınma direncini arttırmaktır [32]. Daha düşük kesici takım aşınması ile daha pürüzsüz yüzeylerin elde edileceği bir gerçektir. Bu sebeple, TiAlN kaplamalı matkaplar kullanılarak gerçekleştirilen deneylerde daha düşük Ra değerlerinin elde edilmesi, matkap uçlarının kaplama malzemesi ile artan aşınma direnci ve düşük sürtünme katsayısı ile ilişkilendirilebilir [27]. Ayrıca, Ra değerini etkileyen bir başka kriter kesici kenar yarı çapıdır. Kesici kenar yarıçapının artmasıyla daha iyi Ra değerlerinin elde edileceği iyi bilinmektedir. Bu çalışmada, kaplama malzemesinin kesici kenar yarıçapını artırması göz önüne alındığında, TiAlN kaplamalı matkaplar ile kaplamasızlara göre daha düşük Ra değerlerinin elde edilmesinin beklenen bir sonuç olduğu söylenebilir (Şekil 6).



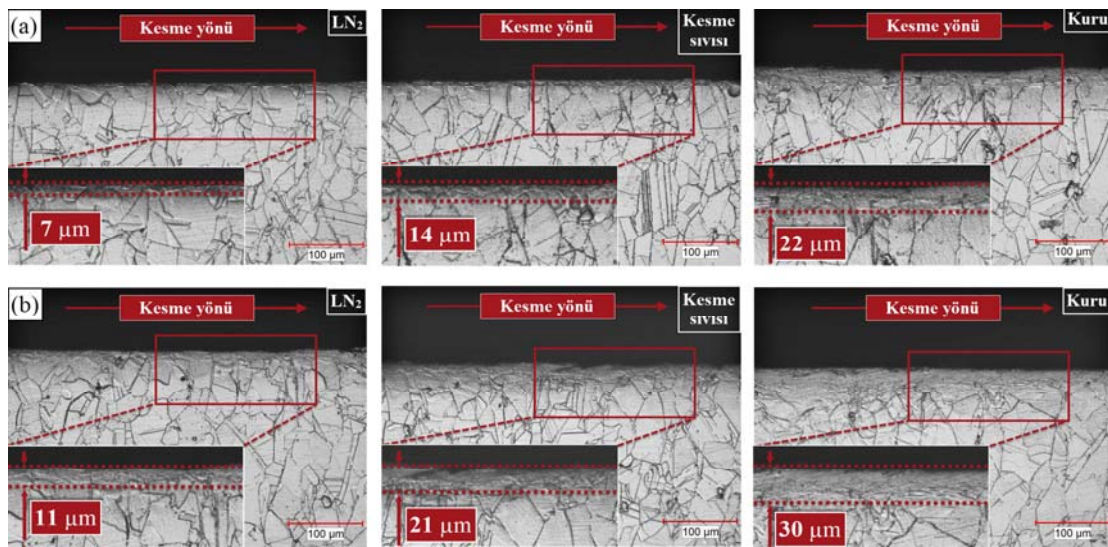
Şekil 6. Yüzey pürüzlülüğü değerleri (Surface roughness values)

3.4. Yüzey Altı Mikroyapı Analizi (Subsurface Microstructure Analysis)

Delme operasyonları ardından kaplamasız (Şekil 7a) ve kaplamalı (Şekil 7b) matkaplar ile gerçekleştirilen deneyler sonucu farklı soğutma/yağlama ortamlarının yüzey altı mikroyapı değişimlerine etkileri Şekil 7'de gösterilmiştir. Delme operasyonu sırasında plastik deformasyon sonucu yüzey altında tane ufalanmasının baskın olduğu bir tabaka meydana gelmiştir. Kriyojenik şartlarda iş parçası malzemesinin gevrekleşmesi sonucu, bu deforme olmuş tabaka kalınlığı diğer şartlara kıyasla daha azdır. Diğer taraftan en fazla yüzey altı plastik deformasyon bölgesi kalınlığı kuru şartlarda gözlemlenmiştir. Yüksek kesme sıcaklıkları ve eksenel kuvvet değerlerinin bu tabaka kalınlığının artmasında önemli rol oynadığı bilinmektedir [33]. Kesme sıvısının kullanıldığı şartlardaki düşük eksenel kuvvet ve tork değerlerinin ve yüksek olmayan sıcaklıkların, kuru şartlardan daha az plastik deformasyon bölge kalınlığı oluşumunu sağladığı söylenebilir. Kaplama malzemesinin tüm işleme şartlarında deforme olmuş bölge kalınlığını arttırdığı tespit edilmiştir. Kaplama malzemesi, kesici kenar yarıçapını bir miktar arttırmaktadır. Bu vd. [34], artan kesici kenar yarıçapının daha fazla ezme etkisi ortaya çıkardığını ve bu durumun yüzey altı mikro yapıyı daha fazla etkilediğini belirtmişlerdir.

3.5. Mikrosertlik Analizi (Microhardness Analysis)

Farklı soğutma/yağlama ortamlarının ve kaplama malzemesinin işlenmiş yüzey altında meydana gelen mikrosertlik değişimine etkileri Şekil 8'de gösterilmektedir. Kriyojenik şartlarda elde edilen sertlik değerleri mikroyapı analizinde elde edilen sonuçlarla paralellik göstermiş ve genel olarak diğer şartlara göre daha düşük sertlik değerleri elde edilmiştir. Talaşlı imalatı gerçekleştirilen sünek bir malzemenin işlenmiş yüzey altında meydana gelen sertlik değişiminin plastik deformasyon bölgesinin kalınlığı ile alakalı olduğu bilinen bir gerçektir [31]. Öte yandan kaplama



Şekil 7. a) Kaplamasız ve b) TiAlN kaplamalı matkaplar ile farklı işleme koşullarında elde edilen yüzey altı deforme olmuş tabaka kalınlıkları

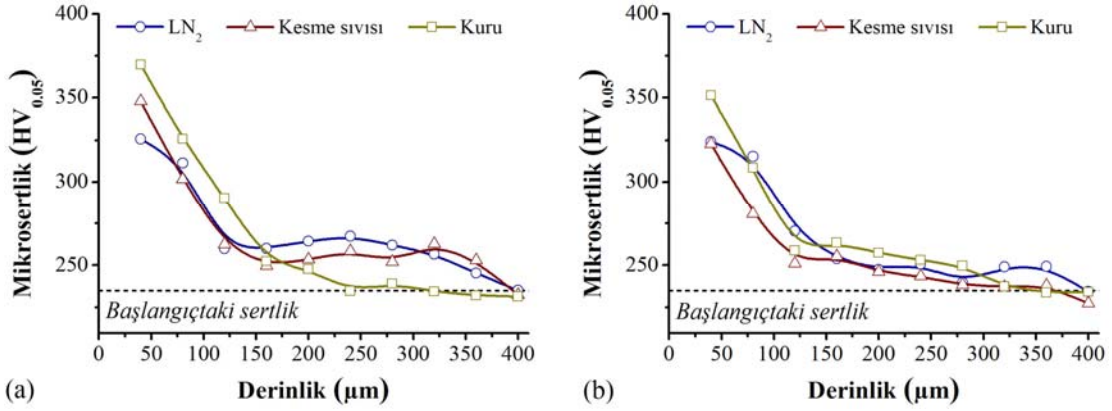
(Deformed subsurface layer thicknesses obtained with a) uncoated and b) TiAlN coated drills under different cutting conditions)

malzemesinin plastik deformasyon bölgesi kalınlığının artmasına sebep olmasına rağmen mikrosertlik değerlerini çok etkilemediği görülmüştür. Kriyojenik soğutma sertlik değerlerinde bir düşüş sağlasa da diğer şartlar ile kıyaslandığında bu değerler arasında fazla bir fark gözlemlenmemiştir. Bu durumun Zhou vd. [33] belirttiği üzere işlenmiş yüzey altında meydana gelen deformasyonun soğutma/yağlama şartlarından ve kaplama malzemesinden daha çok kesme parametrelerinden etkilenmesi şeklinde açıklanabilir.

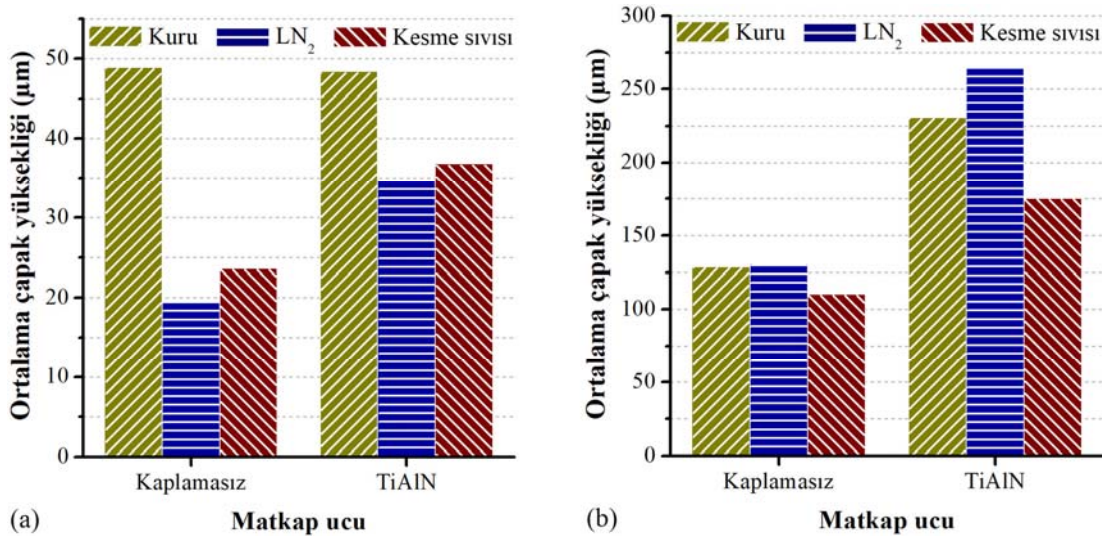
3.6 Çapak Oluşumu (Burr Formation)

Şekil 9, farklı işleme şartlarında delik girişinde ve delik çıkışında meydana gelen ortalama çapak yüksekliği değerlerini göstermektedir. Tüm kesme şartlarında delik girişinde ve çıkışında düzenli çapak oluşmuştur. Delik girişinde meydana gelen çapak yükseklikleri incelendiğinde (Şekil 9a) kuru şartlar altında daha fazla çapak oluşumunun meydana geldiği görülmektedir. Bu durum, kuru şartlardaki

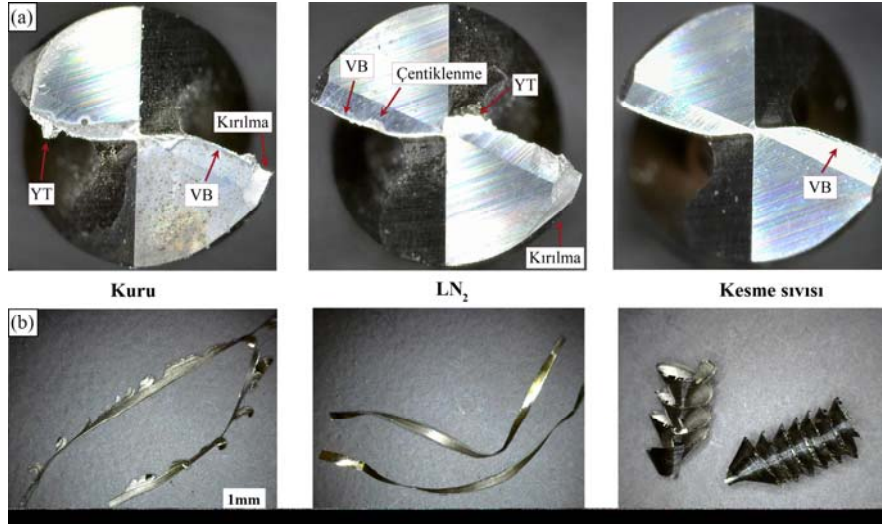
yüksek eksenel kuvvet, tork ve sıcaklık ile ilişkilendirilebilir. Yüksek sıcaklıklar malzeme sünekliliğini arttırmakta ve daha fazla çapak oluşumuna neden olmaktadır [26]. Diğer yandan kriyojenik şartlarda malzeme yüzeyinin etkili bir şekilde soğutulması malzemenin gevrekleşmesine ve delik girişinde oluşan çapak yüksekliklerinin azalmasına sebep olmuştur. Deney sonuçları kriyojenik şartların delik girişindeki çapak oluşumunu %6–60 aralığında azalttığını göstermektedir. Ancak kriyojenik soğutma delik çıkışında meydana gelen çapak yüksekliklerinin artmasına (%34'e kadar) sebep olmuştur (Şekil 9b). Bunun sebebi kriyojenik şartlar altında meydana gelen yüksek eksenel kuvvet ve tork değerleri ve hızlı takım aşınması (Şekil 10a) ile ilişkilendirilebilir. Genel olarak kaplama malzemesi delik girişinde meydana gelen çapak yüksekliğini fazla etkilemezken (5 µm'ye kadar), delik çıkışında oluşan çapak yüksekliğinin %59-103 aralığında artmasına sebep olmuştur. Bu durum kaplama malzemesinin kullanımıyla kesici kenar yarıçapının artması ve buna bağlı olarak daha yüksek eksenel kuvvet ve tork değerlerinin gözlemlenmesi ile ilişkilendirilebilir.



Şekil 8. a) Kaplamasız ve b) TiAlN kaplamalı matkaplar ile farklı işleme koşullarında elde edilen yüzey altı mikrosertlik değerleri (Subsurface microhardness values obtained with a) uncoated and b) TiAlN coated drills under different cutting conditions)



Şekil 9. a) Delik girişi ve b) delik çıkışında ortalama çapak yüksekliği değerleri (The average burr height values at a) hole entrance and b) hole exit)



Şekil 10. Kaplamasız matkaplar ile farklı kesme şartlarında elde edilen a) matkap görüntüleri ve b) talaş tipleri (a) Drill images and b) chip types obtained with uncoated drills under different cutting conditions)

3.7. Talaş Oluşumu (Chip Formation)

Deney sonuçlarının daha iyi açıklanabilmesi için deney sonrası matkaplardaki aşınma durumları ve talaş tipleri incelenmiştir. Şekil 10, kuru, kriyojenik ve kesme sıvısının kullanıldığı şartlar altında kullanılan kaplamasız matkap uçlarının dijital mikroskop görüntülerini (Şekil 10a) ve bu şartlarda meydana gelen talaş tiplerini (Şekil 10b) göstermektedir. Kuru ve kesme sıvısının kullanıldığı koşullarda üç delik delinmiş, ancak karbür matkaplar kriyojenik şartlarda üç delik delmede başarısız olmuştur. Bu sebeple Şekil 10a, kuru ve kesme sıvısının kullanıldığı şartlarda üç delik deldikten sonraki matkap ucunun durumunu gösterirken, kriyojenik şartlarda ise iki delikten sonraki matkabın durumunu göstermektedir. Bu durum, kriyojenik şartlardaki çok düşük sıcaklıkların hem iş parçası malzemesi hem de kesici takımı gevrekletmesi ile ilişkilidir [27]. Sonuç olarak kriyojenik şartlarda hızlı takım aşınması gerçekleşmiştir. Kriyojenik ve kuru şartlar matkap ucunun hızlı aşınmasına neden olmuştur. Yan yüzey aşınması (VB), kesme sıvısının kullanıldığı şartlarda 0,05 mm olarak gözlemlenirken, kuru şartlarda, 0,11 mm ve kriyojenik şartlarda ise 0,08 mm olarak ölçülmüştür. Ayrıca, kuru şartlarda soğutucu/yağlayıcı madde olmayışı YT ve kırılmalara; kriyojenik şartlarda ise kesici takım ve iş parçası malzemesinin aşırı gevrekleşmesi çentiklenme ve kırılmalara sebep olmuştur.

Bu durum kriyojenik şartlar altında elde edilen yüksek aksel kuvvet ve tork değerlerinin bir sonucu olarak görülmektedir. Ayrıca, kesme sıvısının kullanımıyla, orta düzey soğutmanın yanı sıra yağlama özelliğinin takım aşınmasını önemli ölçüde azalttığı ve bu durumun aksel kuvvet ve özellikle tork değerlerini diğer şartlara kıyasla önemli ölçüde düşürdüğü gözlemlenmiştir. Farklı soğutma/yağlama şartlarında farklı tipte talaşların meydana geldiği açıkça görülmektedir (Şekil 10b). Kesme sıvısının kullanıldığı şartlarda konik helisel biçimli talaş tipi; kuru ve kriyojenik şartlarda ise uzun şerit talaş tipi meydana

gelmiştir. Kuru kesme şartında talaş kenarında talaş bütünlüğünü bozacak büyük adımlı yırtılmalar meydana gelmesi, bu şartlarda herhangi bir soğutucu/yağlayıcı madde kullanılmaması nedeniyle YT oluşumu ile ilişkilendirilmiştir. Bu şarttaki talaş örneklerinden talaş oluşumunun zor şartlarda meydana geldiği görülmekte, kuru şartlarda elde edilen yüksek sıcaklık, aksel kuvvet, tork ve yüzey pürüzlülüğü değerleri ve aşırı takım aşınması bu bilgiyi doğrulamaktadır. Kuru şartlarda YT eğilimi sebebiyle bozulan takım geometrisinin düzenli olmayan talaş oluşumuna sebep olduğu söylenebilir. Kriyojenik şartlarda kuru şartlara benzer formda ancak sürekli talaşların elde edilmesi, kriyojenik şartlarda iş parçası malzemesinin aşırı gevrekleşmesi ve bu sayede YT oluşumunun azalması ile ilişkilidir. Sürekli talaşlar ile daha iyi yüzey kalitesinin elde edildiği bilirse de delme operasyonu sırasında kriyojenik şartlarda gevrekleşen talaşın, tahliye sırasında işlenen yüzeyde çizilmelere sebep olduğu ve sonuç olarak yüzey pürüzlülüğünü kötüleştirdiği söylenebilir. Diğer taraftan kesme sıvısının kullanımıyla ideal bir talaş geometrisinin elde edilmesi, kesme sıvısının yağlama etkisi ve orta düzey soğutma ile düşük takım aşınmasının bir sonucu olarak değerlendirilmiştir.

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada Inconel 718 süperalaşımının karbür matkaplar ile boydan boya delinmesinde farklı kesme koşullarının (kuru, kriyojenik, kesme sıvısı) ve kaplama malzemesinin (TiAlN) sıcaklık değerleri, kesme kuvvetleri, yüzey bütünlüğü, çapak ve talaş oluşumu üzerine etkileri araştırılmıştır. Bu araştırmanın bulguları şu şekildedir:

Inconel 718 süperalaşımının delinmesinde kesme bölgesine uygulanan kriyojenik soğutmanın sıcaklık değerlerini önemli derecede düşürdüğü, işlenmiş yüzey altında meydana gelen deformasyon olmuş tabaka kalınlığını azalttığı ve mikrosertlik değerlerini düşürdüğü, ayrıca delik girişinde çapak oluşumunu minimize ettiği tespit edilmiştir. Diğer yandan kriyojenik soğutma şartlarında daha yüksek aksel

kuvvet ve tork değerleri meydana gelmiş ve delik çıkışında daha yüksek çapak oluşumu gözlemlenmiştir. Kuru şartlarda soğutucu ve yağlayıcıların olmayışı, yüksek sıcaklıkların meydana gelmesine, yüksek eksenel kuvvet ve tork değerlerinin oluşmasına ve kötü yüzey kalitesine neden olmuştur.

Kriyojenik ve kuru şartlar ile karşılaştırıldığında kesme sıvısının kullanıldığı şartlarda daha düşük eksenel kuvvet ve tork değerleri, daha iyi yüzey kalitesi, daha az çapak oluşumu, düzenli talaş oluşumu ve düşük takım aşınması gözlemlenmiştir. Kaplama malzemesi, daha düşük Ra değerlerinin elde edilmesini sağlamış, ancak eksenel kuvvet ve tork değerlerinin yükselmesine ve ortalama çapak yüksekliğinin artmasına sebep olmuştur. Deney sonuçları, kriyojenik şartlar altında daha iyi yüzey kalitesi elde etmenin mümkün olduğunu ancak düşük sıcaklıkların işleme performansını olumsuz etkilediğini göstermiştir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Yazarlar, bu çalışmayı 3578 numaralı proje ile destekleyen Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi'ne teşekkür eder.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Oezkaya E., Beer N., Biermann D., Experimental studies and CFD simulation of the internal cooling conditions when drilling Inconel 718, *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 108, 52-65, 2016.
- Chen Y.C., Liao Y.S., Study on wear mechanisms in drilling of Inconel 718 superalloy, *J. Mater. Process. Technol.*, 140 (1-3), 269-273, 2003.
- Aslantaş K., Çiçek A., Çelik S.G., An experimental study on relationship between tool wear-slot geometry in micromachining, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 33 (4), 1285-1298, 2018
- Göv K., Experimental investigation of the effects of the coolant on the performance parameters of electrical discharge drilling of some aerospace materials, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 32 (1), 293-301, 2017.
- Ezugwu E.O., Wang Z.M., Machado A.R., The machinability of nickel-based alloys: a review, *J. Mater. Process. Technol.*, 86 (1-3), 1-16, 1999.
- Sharman A.R.C., Amarasinghe A., Ridgway K., Tool life and surface integrity aspects when drilling and hole making in Inconel 718, *J. Mater. Process. Technol.*, 200 (1-3), 424-32, 2008.
- Dudzinski D., Devillez A., Moufki A., Larrouquere D., Zerrouki V., Vigneau J., A review of developments towards dry and high speed machining of Inconel 718 alloy, *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 44 (4), 439-56, 2004.
- Blau P., Busch K., Dix M., Hochmuth C., Stoll A., Wertheim R., Flushing strategies for high performance, efficient and environmentally friendly cutting, *Procedia CIRP*, 26, 361-366, 2015.
- Groover M., *Fundamentals of Modern Manufacturing Materials, Processes and Systems*, John Wiley & Sons, New York, A.BD., 2010.
- Grzesik W., *Advanced Machining Processes of Metallic Materials: Theory, Modelling and Applications*, Elsevier Science, Oxford, England, 2008.
- Lopez De Lacalle L.N., Perez-Bilbatua J., Sanchez J.A., Llorente J.L., Gutierrez A., Alboniga J., Using high pressure coolant in the drilling and turning of low machinability alloys, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 16 (2), 85-91., 2000.
- Zeilmann R.P., Weingaertner W.L., Analysis of temperature during drilling of Ti6Al4V with minimal quantity of lubricant, *J. Mater. Process. Technol.*, 179 (1-3), 124-127, 2006.
- Perçin M., Aslantaş K., Uçun I, Kaynak Y., Çiçek A., Micro-drilling of Ti-6Al-4V alloy: The effects of cooling/lubricating, *Precis. Eng.*, 45, 450-462, 2016.
- Armin Gharibi, Yusuf Kaynak, The influence of depth of cut on cryogenic machining performance of hardened steel, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University* (2018), <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.416423>.
- Shokrani A., Dhokia V., Newman S.T., Comparative investigation on using cryogenic machining in CNC milling of Ti-6Al-4V titanium alloy, *Mach. Sci. Technol.*, 20 (3), 475-494, 2016.
- Aramcharoen A., Influence of cryogenic cooling on tool wear and chip formation in turning of titanium alloy, *Procedia CIRP*, 46, 83-86, 2016.
- Ezugwu E.O., High speed machining of aero-engine alloys, *J. Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.*, 26 (1), 1-11, 2004.
- Kaynak Y., Lu T., Jawahir I.S., Cryogenic machining-induced surface integrity: A review and Comparison with dry, MQL, and flood-cooled machining. *Mach. Sci. Technol.*, 18, 149-198, 2014.
- Yildiz Y., Nalbant M., A review of cryogenic cooling in machining processes, *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 48 (9), 947-964, 2008.
- Ahmed L.S., Kumar M.P., Cryogenic drilling of Ti-6Al-4V alloy under liquid nitrogen cooling, *Mater. Manuf. Processes*, 31 (7), 951-959, 2016.
- Biermann D., Hartmann H., Reduction of burr formation in drilling using cryogenic process cooling, *Procedia CIRP*, 3, 85-90, 2012.
- Giasin K., Ayvar-Soberanis S., Hodzic A., The effects of minimum quantity lubrication and cryogenic liquid nitrogen cooling on drilled hole quality in GLARE fibre metal laminates, *Mater. Des.*, 89, 996-1006, 2016.
- Xia T., Kaynak Y., Arvin C., Jawahir I.S., Cryogenic cooling-induced process performance and surface integrity in drilling CFRP composite material., *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 82 (1-4), 605-616, 2016.
- Aramcharoen A., Chuan S.K., An experimental investigation on cryogenic milling of inconel 718 and its sustainability assessment, *Procedia CIRP*, 14, 529-534, 2014.
- Pusavec F., Hamdi H., Kopac J., Jawahir I.S., Surface integrity in cryogenic machining of nickel based alloy

- Inconel 718, *J. Mater. Process. Technol.*, 211 (4), 773-783, 2011.
26. Uçak N., Çiçek A., The effects of cutting conditions on cutting temperature and hole quality in drilling of Inconel 718 using solid carbide drills, *J. Manuf. Process.*, 31, 662-673, 2018.
 27. Uçak N., The effects of cutting conditions on cutting temperature and hole quality in drilling of Inconel 718 using solid carbide drills, Yüksek Lisans Tezi, Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2017.
 28. Hong S.Y., Ding Y., Jeong W., Friction and cutting forces in cryogenic machining of Ti-6Al-4V, *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 41 (15), 2271-2285, 2001.
 29. Stephenson D.A. ve Agapiou J.S., *Metal Cutting Theory and Practice*, CRP Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton, A.B.D., 2016.
 30. Outeiro J.C., Lenoir P., Bosselut A., Thermo-mechanical effects in drilling using metal working fluids and cryogenic cooling and their impact in tool performance. *Prod. Eng.*, 9 (4), 551-562, 2015.
 31. Thakur A., Gangopadhyay S., State-of-the-art in surface integrity in machining of nickel-based super alloys, *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 100, 25-54, 2016.
 32. Pervaiz S., Rashid A., Deiab I., Nicolescu M., Influence of tool materials on machinability of titanium- and nickel-based alloys: A review, *Mater. Manuf. Processes*, 29 (3), 219-252, 2014.
 33. Zhou J.M., Bushlya V., Stahl J.E., An investigation of surface damage in the high speed turning of Inconel 718 with use of whisker reinforced ceramic tools, *J. Mater. Process. Technol.*, 212 (2), 372-384, 2012.
 34. Pu Z., Outeiro J.C., Batista A.C., Dillon O.W., Puleo D.A., Jawahir I.S., Enhanced surface integrity of AZ31B Mg alloy by cryogenic machining towards improved functional performance of machined components, *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 56, 17-27, 2012.