



Effect of MQL conditions on milling of AISI 316L type stainless steels

Lütfi Taner Tunç^{1,2}

¹Nuclear Advanced Manufacturing Research Centre, The University of Sheffield, Sheffield, S60 5WG, UK

²Faculty of Engineering and Natural Sciences, Sabanci University, Tuzla, Istanbul, 34956, Turkey

Highlights:

- Experimental analysis on tool life and tool wear in milling of AISI 316L under MQL conditions.
- Comparison of oil types on tool wear progression and tool life in milling of AISI 316L under MQL conditions.
- Vegetable ester found to be providing most stable wear progress with the longest tool life.

Keywords:

- MQL
- Milling
- Tool life
- AISI 316L

Article Info:

Research Article
Received: 13.06.2018
Accepted: 29.11.2018

DOI:

10.17341/gazimmfd.571466

Acknowledgement:

EPSRC
The Univ. of Manchester
The University of Sheffield
CIMCOOL Fluid Tech
Houghton Chemicals

Correspondence:

Author: Lütfi Taner Tunç
e-mail:
ttunc@sabanciuniv.edu
phone: +90 216 300 1305

Graphical/Tabular Abstract

In large-scale part manufacturing industries such as nuclear, aerospace and power generation, robotic milling is potentially a promising portable manufacturing technology to decrease the overall costs. The lack of enclosures around the robotic milling units blocks the use of flood coolant contrary to CNC machining centres. In such cases, the minimal quantity lubrication (MQL) technique is suitable, which on the other hand, agrees with the green manufacturing theme of the industry in the 21st century. However, the effect of MQL parameters such as the air pressure, oil flow rate, oil type, and pulse rate on tool life and surface integrity in end milling have not been well studied and understood yet. In this paper, the MQL technique is studied to understand its effects on tool life and surface integrity in end milling of nuclear manufacturing grade stainless steels such as AISI316L. The experiments are performed using a robotic milling cell. The tool life is assessed by measuring the wear land using optical microscopy techniques, whereas the surface integrity is assessed in terms of surface residual stress (XRD) and surface roughness (optical metallography).

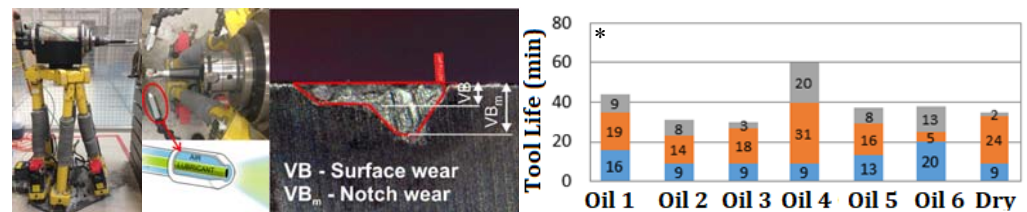


Figure A. Representation of robotic milling with MQL system and general results. (*Oil1: Vegetable, Oil2: Fatty alcohol, Oil3: Synthetic ester, Oil4: Biodegradable vegetable ester, Oil 5: Mineral, Oil 6: Water-based ester, blue: fast wear, orange: stable wear, grey: final wear)

Purpose: This study aims to investigate the effects of MQL conditions and oil types on the tool wear progression and tool life in milling of AISI 316L type stainless steel.

Theory and Methods:

It was proposed that better tool life performance and surface integrity can be achieved if the parameters and oil type is selected appropriately, in MQL milling. The study involves design of experiments through factor analysis. The experiments were performed in two phases. In the first phase the effect of MQL working conditions were investigated. Then, the effect of oil type was tested based on the improved working conditions of the same MQL system.

Results:

The results show that MQL conditions and the oil type significantly affects the tool wear, tool life and surface integrity. Improve surface roughness was observed at 15 strokes/min at 75 ml/h of fluid flow rate. It was observed that high stroke rate with increased oil flow leads to decrease in the surface residual stress. This may be related to the decreased thermal variations on the workpiece surface when there is enough lubrication going between the tool and workpiece. In MQL assisted milling, the most stable tool wear progress and the longest tool life was observed when using vegetable-based oil, which is soluble in environment. Especially, it was found that use of synthetic MQL oils do not help to increase tool life compared to dry cutting. When water-based synthetic oils were used, the stable wear progress duration was found to be very short.

Conclusion:

MQL can lead to significantly improved tool wear progression and tool life compared to dry cutting when correct settings and oil type is used. This would also improve the surface integrity in terms of surface roughness and surface residual stresses.



AISI 316L tipi paslanmaz çeliklerin frezelemede MQL şartlarının takım ömrüne etkisi

Lütfi Taner Tunç^{1,2*}

¹Nuclear Advanced Manufacturing Research Centre, The University of Sheffield, Sheffield, S60 5WG, UK

²Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Sabancı Üniversitesi, Tuzla, 34956, İstanbul, Türkiye

Ö N E Ç İ K A N L A R

- AISI 316L tipi paslanmaz çeliklerin frezelemede MQL şartlarında takım ömrü ve aşınmasının deneysel analizi.
- AISI 316L tipi paslanmaz çeliklerin frezelemede takım aşınması gelişimi ve takım ömrü için MQL şartlarının ve yağ tiplerinin etkisinin karşılaştırılması.
- Bitkisel bazlı yağların en kararlı aşınma gelişimine ve en uzun takım ömrünü sağladığının gözlemlenmesi.

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi
Geliş: 13.06.2018
Kabul: 29.11.2018

DOI:

10.17341/gazimmfd.571466

Anahtar Kelimeler:

MQL,
frezeleme,
takım ömrü

ÖZET

Nükleer, havacılık ve enerji sektörlerindeki büyük ölçekteki parçaların üretiminde ve bakımında kullanılan talaşlı imalat süreçlerinin toplam maliyetini düşürmek amacıyla robotik frezeleme, taşınabilir imalat yaklaşımı açısından, önemli fırsatlar sunmaktadır. Ancak robotik frezeleme sistemleri etrafında su geçirmez kabin bulunmaması, CNC işleme merkezlerinde kullanılan yüksek akışlı soğutma tekniklerinin kullanımına izin vermemektedir. Böyle durumlarda, özellikle metalik malzemelerin frezelemede en az miktarda yağlama (MQL) tekniği öne çıkmaktadır. Ancak, MQL sistemlerinde kullanılan, hava basıncı, yağ akış oranı, yağ tipi ve yağlama sıklığı gibi parametrelerin frezelemede takım ömrüne etkisi konusunda çok fazla çalışma yapılmamıştır ve bu konuda araştırılması gereken yönler vardır. Bu makalede, AISI 316L gibi nükleer imalat sektöründe çokça kullanılan paslanmaz çeliklerin frezelemede MQL teknolojisinin takım ömrüne etkilerinin anlaşılması için deneysel sonuçlar sunulmuş ve tartışılmıştır. Kesme testleri, robotik frezeleme hücresinde yapılmış ve takım ömrü de optik mikroskopi yöntemleriyle takım üzerindeki aşınma alanı ölçülerek değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre MQL şartlarının takım aşınmasına ve yüzey bütünlüğüne önemli etkisi olduğu belirlenmiştir. Bununla birlikte, MQL yağlarının tipi de takım aşınması ve ömrünü önemli derecede etkilemektedir. AISI 316L tipi çeliğin MQL ile frezelemede en uzun takım ömrü, doğada çözünebilen bitkisel tabanlı yağ ile elde edilmiştir. Bazı MQL yağlarının, kuru kesmeye çok yakın takım ömrü sağladığı da gözlemlenmiştir.

Effect of MQL conditions on tool life in milling of AISI 316L stainless steel

H I G H L I G H T S

- Experimental analysis on tool life and tool wear in milling of AISI 316L under MQL conditions.
- Comparison of oil types on tool wear progression and tool life in milling of AISI 316L under MQL conditions.
- Vegetable ester found to be providing most stable wear progress with the longest tool life.

Article Info

Research Article
Received: 13.06.2018
Accepted: 29.11.2018

DOI:

10.17341/gazimmfd.571466

Keywords:

MQL,
milling,
tool life

ABSTRACT

In large-scale part manufacturing industries such as nuclear, aerospace and power generation, robotic milling is potentially a promising portable manufacturing technology to decrease the overall costs. The lack of enclosures around the robotic milling units blocks the use of flood coolant contrary to CNC machining centres. In such cases, the minimal quantity lubrication (MQL) technique is suitable, which on the other hand, agrees with the green manufacturing theme of the industry in the 21st century. However, the effect of MQL parameters such as the air pressure, oil flow rate, oil type, and pulse rate on tool life and surface integrity in end milling have not been well studied and understood yet. In this paper, the MQL technology is studied to understand its effects on tool life and surface integrity in end milling of nuclear manufacturing grade stainless steels such as AISI316L. The milling experiments are performed using a robotic milling cell. The tool life is assessed by measuring the wear land using optical microscopy techniques, whereas the surface integrity is assessed in terms of surface residual stress (XRD) and surface roughness (optical metallography). The results show that MQL conditions and the oil type significantly affects the tool wear, tool life and surface integrity. Improve surface roughness was observed at 15 strokes/min at 75 ml/h of fluid flow rate. It was observed that high stroke rate with increased oil flow leads to decrease in the surface residual stress. It was found that use of synthetic MQL oils do not help to increase tool life compared to dry cutting. When water-based synthetic oils were used, the stable wear progress duration was found to be very short.

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: ttunc@sabanciuniv.edu / Tel: +90 216-300 1305

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Metal kesmede, takım ömrünü uzatmak ve aşınmasını kontrol edebilmek için kesici kenar ucundaki ısının takımdan uzaklaştırılması gerekir. Bu amaçla, genellikle suyla soğutma yaklaşımı kullanılır ki burada yüksek miktarda soğutma suyu karışımı düşük basınçta takım ucuna uygulanır. Ancak, atık yönetimi, operatör sağlığı ve çevreye olumsuz etkileri sebebiyle gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerde bu konuda çeşitli düzenlemeler gündemdedir. Minimum miktarda yağlama (MQL), metal işleme sıvılarının endüstride kullanımını azaltmaya yönelik önerilen tekniklerden biridir. Talaşlı imalat alanında çeşitli fırsatlar sunan robotik frezeleme ele alındığında, MQL tekniği metal frezeleme sırasında soğutma alternatifi olarak ilk sırada görülmektedir.

MQL konusunda yapılan daha önceki çalışmalar, yağlayıcı akışkanın takım-talaş arasına püskürtülmesinde daha iyi kontrol sağladığını göstermiştir [1]. Kullanımının kolaylığı ve kurulumundaki düşük maliyet sebebiyle MQL, robotik frezelemede soğutma tekniği olarak uygun değerlendirilen ve iyileştirilmiş şartların belirlenmesi için üzerinde daha fazla araştırılma yapılması gereken bir yaklaşımdır [2]. Nükleer güç istasyonlarında ve enerji sektöründe çokça kullanılan ısı değiştiriciler ve basınç kazanları gibi bileşenler yüksek sıcaklıkta ve basınçtaki su buharı ortamında çalışmaktadır ve bu sebeple, yüksek dayanım, mükemmel paslanmazlık, sürüme ve oksitlenme direnci gibi özellikle sahip olan AISI 316L tipi paslanmaz çeliklerden üretilirler. Diğer yandan, bu tip metallerin içerisindeki göreceli olarak yüksek nikel ve krom içeriği “work hardening” özelliğini artırarak kesilebilirliği düşürmektedir.

Güncel bir derleme makalesinde, Shokrani vd. [2] titanyum ve nikel temelli alaşımlar, paslanmaz çelikler ve kompozit malzemeler gibi zor kesilen malzemelerin işlenmesinde kullanılan soğutma tekniklerini karşılaştırmıştır. Bu karşılaştırmada takım aşınması gelişimi, takım ömrü, talaş oluşumu, yüzey pürüzlülüğü, yüzeydeki artık gerinim, kesme kuvvetleri ve çevreyle ilgili konular performans kistası olarak dikkate alınmıştır. Her ne kadar, AISI 316L gibi ostenitli paslanmaz çeliklerin frezelemesine özel bir veri ya da sonuç tartışılmamış olsa da kuru kesme, MQL, soğuk hava ve kriyojenik işleme değerlendirilmiş ancak hiçbiri sulu kesmeye alternatif olarak belirlenmemiştir. MQL uygulamalarında, nozul çıkış basıncı, nozul – iş parçası arasındaki mesafe, nozulun ilerleme yönüne göre açısı ve yağ tiplerinin performansı etkileyici en önemli parametreler olduğu belirtilmiştir. Bununla birlikte, soğutma teknikleri, kesici takım malzemeleri, kesme parametreleri ve takım geometrileri üzerinden daha fazla araştırma yapılması önerilmiştir. Buna göre, MQL konusunda, özellikle AISI 316L gibi metallerin frezelemesine yönelik daha fazla araştırmanın gerekliliği ortadadır. MQL konusundaki ilk öncül çalışmalardan birinde, Rahman vd. [3] MQL tekniğini sulu kesmeyle, kesme kuvveti, takım aşınması, yüzey pürüzlülüğü ve talaş şekli yönleriyle ASSAB 718HH

çeliğinin frezelemesinde karşılaştırmıştır. Kesici takım yüzeyinde kırılmalara yol açmaması sebebiyle MQL, sulu kesmeye göre tercih edilebilir olarak belirtilmiştir. MQL ile yağlama sırasında oluşan takım aşınması değerleri, sulu soğutma tekniğiyle karşılaştırılabilir olarak belirlenmiştir. İki teknikte de takım ucunda ufalanma gözlemlenmezken MQL, takımın serbest yüzeyinde daha fazla aşınmaya sebep olmuştur. MQL ile sulu kesmenin yaklaşık olarak aynı büyüklükte kesme kuvvetine yol açtığı da görülmüştür. Deneysel çalışmalarda bir diğer gözlem ise, MQL kullanımında sulu kesmeye göre daha az çapaklanma olmasıdır. Lacalle vd. [4] 5083-H112 serisi alüminyum alaşımının frezelemesinde yağ-su karışımının kullanıldığı sulu soğutmayla MQL yöntemini deneysel ve hesaplamalı akışkanlar dinamiği tabanlı benzetimlerle karşılaştırmıştır. Buna göre, MQL nozulunun duruşunun daha uzun takım ömrüne erişilmesi için çok önemli olduğu gösterilmiştir. Bununla birlikte, emülsiyon tipi soğutmada soğutucunun, yüksek hızlı frezeleme şartlarında, takım-talaş arasına, MQL tekniğinin aksine, giremediği ve MQL kullanımında “aerosol” haline gelen yağ parçacıklarının bu görevi daha iyi gerçekleştirdiği belirtilmiştir. Liao ve Lin [5] sertleştirilmiş çeliğin yüksek hızda frezelemesinde MQL mekanizması üzerinde çalışmış ve kuru frezelemeye göre MQL’in çok daha uzun takım ömrü sağladığını göstermiştir. Yaptıkları çalışmadaki sonuçlara göre MQL, talaş ve kesici kenar arasına daha fazla oksijen sağlayarak bu bölgede, difüzyon bariyeri olarak görev yapan, Fe, Mn, Si ve Al elementlerini içeren koruyucu bir oksit tabakasının oluşmasını sağladığını ve böylece daha iyi bir takım ömrüne ulaşıldığını göstermiştir. Bu gözleme göre, bahsedilen koruyucu tabakanın kararlı şekilde oluşumuna izin veren bir uygun kesme hızı, deneysel olarak, önerilmiştir. Dhar vd. [6] MQL yağlama tekniğinin kesme sıcaklığı, takım aşınması, yüzey pürüzlülüğü ve boyutsal sapmalara olan etkisinin AISI 4340 tipi çeliğin karbür uçlarla frezelemesinde deneysel olarak incelemiştir. AISI 4340 çeliğinde elde edilen sonuçlara göre MQL, takım aşınması hızınca, boyutsal hassasiyette ve yüzey pürüzlülüğünde, kesme bölgesi sıcaklığını düşürerek ciddi bir etki yaptığı gözlemlenmiştir.

Literatürde, ostenitli paslanmaz çeliklerin frezelemesi için MQL kullanımında takım ömrü verisi ve uygulamasına yönelik çalışmalar az sayıdadır. Ender çalışmalardan birinde Okada vd. [7] MQL tekniğinin performansını AISI 1050 ve AISI 304 tipi paslanmaz çelik ve Ti64 titanyum alaşımların kaplamalı karbür takımlarla frezelemesi üzerinde gözlemlemiştir. Yaptıkları incelemelerde, takımın serbest yüzeyindeki sıcaklık, kesme kuvvetleri, takım aşınması mekanizması ve yüzey pürüzlülüğü gibi ölçütlere odaklanmışlardır. MQL kullanıldığında takımın serbest yüzey sıcaklığının kuru kesmeye göre, özellikle düşük kesme hızlarında, azaldığını göstermişlerdir. Bununla birlikte, AISI 304 malzemesinin frezelemesinde MQL kullanımıyla yüzey pürüzlülüğünün ve kesme kuvvetlerinin azaldığını da gözlemlemiştirler. Bu sonuçlar değerlendirildiğinde, MQL tipi soğutma tekniğinin ostenitli paslanmaz çeliklerin frezelemesinde makul bir yöntem

olduğu söylenebilir. Bu konudaki başka bir çalışmada da Abou-El Hossein [8] kuru ve ıslak kesme koşullarını 150, 190, 225 ve 260 m/dk hızlarında karşılaştırdıkları çalışmada takım ömrü ölçütü olarak 0,3mm'lik aşınmayı sınır belirlemişlerdir. 150 m/dk kesme hızında, ıslak ve kuru kesme koşullarında takım ömrü 12 ve 9 dakika olarak belirlenmiştir. Bu çalışmadaki sonuçlara göre ana aşınma mekanizması, AISI 304 çeliklerinin “work hardening” özellikleri sebebiyle “çentik” aşınma olarak gözlemlenmiştir. Thepsonthi [9] vd. MQL kullanımını, sertleştirilmiş ASSAB DF3 takım çeliğinin yüksek hızlı frezelemede, kuru, sulu kesme ve MQL tekniklerini karşılaştırarak incelemiştir. Çalışmalarında, MQL yağımı 20 MPa basınçta, “pulse-jet” yöntemiyle uygulamışlardır ve saniyede 400 darbe ile 120 ml/saat akış miktarı kullanmışlardır. MQL performansının, kuru kesme ve sulu soğutma yöntemlerine göre yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınması yönünden daha iyi olduğunu göstermişlerdir. Zhong vd. [10] AL7075 malzemenin frezelemesini MQL şartlarında ve kuru kesme şartlarında olmak üzere kesme sırasındaki titreşim sinyallerini kullanarak karşılaştırmıştır. Deneysel gözlemlerinde, akışkan oranının kesme sırasındaki titreşim sinyallerini etkilediğini göstermişlerdir ve bununla birlikte MQL yönteminin kaba talaş kaldırma süreçlerinde uygulanabilir olduğu sonucuna varmışlardır. MQL uygulamalarında kullanılan yağların, düşük kullanım miktarları sebebiyle, doğada çözünme, oksitlenme kararlılığı ve depolama süresi gibi ikincil karakteristikleri en az yağlama performansları kadar önemlidir [1]. Literatürde, soğutma tekniklerinin çevresel etkilerine odaklanan çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Bu bölümde, bu konudaki temsili çalışmalara değinilmiştir. MQL uygulamalarında sentetik ester, yağ bazlı alkol ve bitkisel yağ tabanlı sıvılar kullanılmaktadır [1]. Güncel bir derleme makalesinde bitkisel yağ tabanlı metal işleme sıvılarının kullanımı tartışılmıştır [11]. Bu makalenin odak noktası, bitkisel yağ tabanlı sıvıların, mineral yağ tabanlı sıvılara göre benzer performansı vermekle birlikte çevreye olan faydalarının vurgulanmasıdır. Bitkisel yağ tabanlı kesme sıvılarının çeşitli çeliklerin frezelemedeki performansının tartışılması yanında bu tip yağların geliştirilmesindeki araştırma ve geliştirme yönündeki zorluklar da anlatılmıştır. Bu konudaki öncül çalışmalardan birinde Suda vd. [12], sentetik ester ve bitkisel yağların birincil, yağlama verimi ve ikincil, çevresel uygunluk, performanslarını değerlendirmiştir. Elde edilen sonuçlara göre bitkisel yağların sentetik esterlere göre ciddi derecede düşük oksitlenme ve depolama kararlılığı gösterdiği belirlenmiştir. Bununla birlikte, polyol esterlerin kesme performansının suda çözünen soğutucu yağlar kadar iyi ve bitkisel yağlara göre çok daha iyi olduğu gösterilmiştir. Bu değerlendirmelerde, polyol esterlerin MQL uygulamaları için çok uygun olduğu vurgulanmıştır. MQL odağında, son dönemde yapılan çalışmalarda MQL parametrelerinin eniyilemesi üzerine çalışmalar sürdürülmektedir. Güncel bir çalışmada Yıldırım vd. [13] Waspaloy tipi süper alaşımların frezelemede MQL etkisini inceleyerek deneysel sonuçları MQL ayarlarının, Taguchi yöntemiyle, en iyi yağlama performansı için belirlenmesinde kullanmıştır.

Gerçekleştirdikleri çalışmada dört farklı tipte, bitkisel, sentetik, mineral ve mineral sentetik, MQL yağı kullanmışlardır. Deneysel verilerle, yüzey pürüzlülüğü için matematik modeller oluşturmuşlardır. Elde ettikleri sonuçlara göre yağ tipinin ve akış oranının yüzey pürüzlülüğüne çok önemli etkisi olduğunu belirlemişlerdir. Bununla birlikte, doğrulama testleriyle, MQL ile frezelemede en düşük yüzey pürüzlülüğünü elde etmek için Taguchi yönteminin uygun olduğunu belirtmişlerdir. Bu yöndeki bir diğer çalışmada Mia vd. [14] AISI 4140 tipi sertleştirilmiş çeliklerin frezelemede MQL tekniğinin kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğüne göre eniyilemesini, Taguchi yöntemiyle, incelemiştir. Bu çalışmada da yağlama oranının yüzey pürüzlülüğünü önemli ölçüde etkilediği belirlenmiştir ve gerçekleştirilen çalışma şartlarında 150 ml/saat oranındaki yağlamanın etkili sonuçlar verdiği gösterilmiştir. Son yıllarda, MQL alanındaki güncel çalışmalar özellikle nano parçacıkların ve nano sıvıların MQL performansını arttırmasına yönelmeye başlamıştır [15-19]. Bu çalışmalarda, MQL içerisine katılan nano cisimlerin yağlama ve ısı soğurma performansı ile birlikte dolayısıyla takım ömrünü iyileştirdiği vurgulanmıştır.

MQL uygulamalarında kullanılan farklı yağlar hakkında önemli sonuçlar bulunsa da literatürde östenitli çeliklerin frezelemede bu yağların performansına yönelik tam karşılaştırma ve sonuç çok kısıtlıdır. Bu alandaki araştırma eksikliği de dikkate alındığında bu makale, AISI 316L tipi paslanmaz çeliklerin robotik frezelemede MQL kullanımının performansını deneysel olarak değerlendirmeye odaklanmıştır. Kesme testleri iki aşamada gerçekleştirilmiştir. Birinci aşamada, hava basıncı, dakikadaki pulse sayısı, hava akışı gibi MQL parametrelerinin yağlama performansına yüzey pürüzlülüğü, artık yüzey gerinim ve takımın ısıdan etkilenen alanı gibi yönlerden etkisi incelenmiştir. İkinci aşama testlerde yağ bazlı alkol, sentetik ester ve bitkisel tabanlı yağların MQL uygulamasındaki performansları, takım ömrü ve yüzey bütünlüğü yönlerinden incelenmiştir. Bu bölümden sonra, makale şu şekilde planlanmıştır. 2. bölümde, MQL kullanılan robotik frezeleme sistemi anlatılmıştır. Bunu, deneyler ve deney düzeneği 3. bölümde takip etmektedir. Son olarak, deneysel sonuçlar 4. bölümde verilmiş ve makale değerlendirmeler ve tartışmayla tamamlanmıştır.

2. ROBOTİK FREZELEME SİSTEMİ VE DENEY TASARIMI (ROBOTIC MILLING SYSTEM AND DESIGN OF EXPERIMENTS)

Bu çalışmada kesme testleri, üzerinde iş mili ve MQL spreyleme ünitesi takılı Stewart tipi hexapod robot üzerinde gerçekleştirilmiştir. Bu bölümde ilgili robotik frezeleme sisteminin teknik verileriyle birlikte deney tasarımı anlatılmıştır.

2.1. Robotik frezeleme sistemi (Robotic milling system)

Robotik frezeleme sistemi, Fanuc R-30iA kontrollü, Fanuc F200iB Stewart tipi hexapod robot üzerine kurulmuştur.

Robotun her bacağına 1 kW güç sağlayabilen servo motorlarla doğrusal hareket sağlanmaktadır. Robotun taşıyıcı tablası 8 kW gücünde ve 6000 devire çıkabilen bir iş mili taşımaktadır (Şekil 1). Yük kapasitesi 100 kg olan robot aynı zamanda 60kgfm momenti de kaldırabilecek kapasitededir. Y eksenin 18 m/dk ve X-Z düzleminde 90 m/dk ilerleme hızına çıkabilen robot tipik frezeleme süreçlerini gerçekleştirebilecek kapasitededir. MQL sisteminde, yağ ve hava, Şekil 1b’de görüldüğü gibi iki kanallı nozullardan sağlanmaktadır. MQL parametreleri Şekil 1c’de gösterilen analog kontrol panelinden ayarlanmaktadır. Burada (i) hava basıncı valfi, (ii) atım sayısı ayarı ve (iii) hava akışı ayarlayıcısı olarak belirtilebilir. Basıncı hava, yağ ile iki farklı kanaldan sağlanarak nozulun ucunda bu karışır ve burada sprey etkisi oluşur. Deneylerde kullanılan MQL ünitesi, 800 cSt (40 °C) akışkanlıkta yağı tek itki için 40 mm³ hacimde pompalayabilmektedir ve dakikadaki atım sayısı 1 ile 240 arası değiştirilebilmektedir. Hava akışını ayarlayan vidanın 11 adımı vardır ve hava basıncı 4,5 bar ile 7 bar arasında değiştirilebilir. Literatürde yapılan çalışmalar, hava basıncı, hava-yağ oranı ve atım sayısının MQL için yağlama performansını, takım ömrü ve yüzey bütünlüğü yönlerinden etkilediğini göstermiştir. Diğer bir açıdan bakıldığında, yağ kullanım miktarı ve MQL performansı arasındaki orantı düşünüldüğünde uygun MQL parametre değerlerini belirlemek, çevreye etkinin azaltılması yönünden de önemlidir. Kesme testleri sırasında, robotun takımıyolu programlaması açıklandığı şekilde yapılmıştır; iş parçası üzerinde fiziksel bir nokta ve X, Y, Z eksen takımı robot üzerinde bir kullanıcı koordinat sistemi olarak tanımlanmıştır. Takımın uç noktası da takım koordinat sistemi olarak belirlenmiştir. Takımıyolu, Siemens NX9 © yazılımı kullanılarak, kesici takımın uç noktaları elde edilecek şekilde hesaplanmış ve daha sonra robot diline çevrilmiştir.

2.2. AISI 316L tipi paslanmaz çeliklerin işlenebilirliği (Machinability of AISI316L stainless steel)

Austenitic paslanmaz çelikler, yüksek “work hardening” özellikleri sebebiyle, kesilmesi zor malzemeler olarak

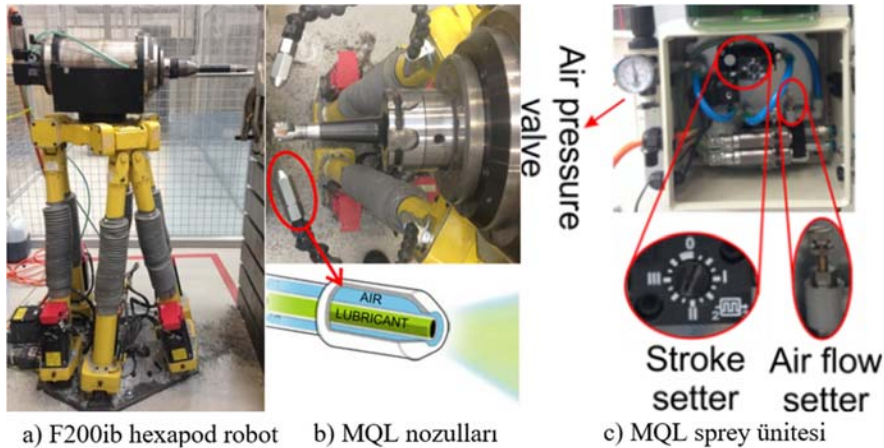
bilinmektedir. Malzeme içeriğindeki nickel ve krom alaşımları, bu malzemelerin kesilebilirlik derecesini düşürerek, makul kesme hızlarında dahi bir saatten düşük takım ömrüne sebep olmaktadır. Bu bölümde, AISI 316L paslanmaz çeliklerinin kesilebilirlik özellikleri özetle anlatılarak, okuyucuya bu malzemelerin talaşlı imalat şartlarındaki davranışı hakkında genel bilgi verilmesi amaçlanmıştır. AISI 316L tipi paslanmaz çeliği AISI 316 tipi paslanmaz çeliklerin işlenebilirliği iyileştirilmiş tipidir. Sırasıyla, düşük karbon-krom-nikel-molibdenum içeriği bulunduğundan yüksek dayanım ve mükemmel paslanma direnci gösterirler. AISI 316L chloride ve kompleks sülfür bileşenlerine karşı dirençlidir. AISI 316L’de bulunan %2-3 oranındaki molibdenum içeriği, “pitting corrosion” direnci ve yüksek sıcaklıktaki creep dayanımını artırır. Bununla birlikte yüksek çalışma sıcaklıklarında oksitlenme direnci de yüksektir. Bu tip özellikler sebebiyle, AISI 316L, nükleer imalat ve enerji sektörlerinde tasarlanan basınç kazanları ve ısı değiştiriciler için mükemmeldir.

Nükleer imalat için bu kadar uygun malzeme özellikleri sağlamakla birlikte, AISI 316L, tipik olarak, yumuşak çelik S1214’e göreli olarak %50-55 oranında bir kesilebilirlik indisine sahiptir. “Work hardening” özelliği bulunduğundan, kesici takımların uçlarının keskin kalması, iş parçası yüzeyinde gereksiz artık gerinim bırakmamak için önemlidir. Bu malzemelerdeki “work hardening” özelliğinin, talaşlı imalat süreçlerinde takım üzerinde çentik tipi aşınmaya sebep olduğu bilinmektedir.

2.3. Deneysel tasarım (Design of experiments)

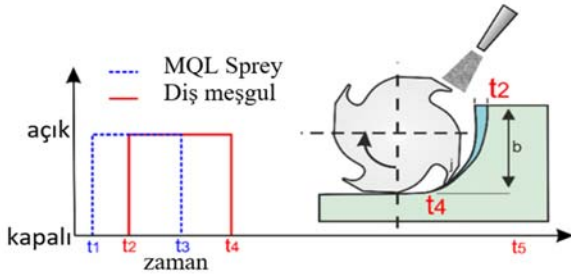
MQL şartlarını ve yağ tipinin takım ömrü, yüzey bütünlüğü gibi sonuçlara etkisini incelemek için iki aşamada deneyler gerçekleştirilmiştir. İlk aşamanın amacı, iyileştirilmiş yüzey bütünlüğü ve takım ucu yağlaması için tercih edilebilecek MQL sistem parametrelerini belirlemektir. Sonrası aşama deneylerde MQL yağ tipinin etkileri üzerine çalışılmıştır.

İlk aşama deneylerde hava basıncı, dakikadaki atım sayısı ve hava akış miktarı gibi parametrelerin MQL performansına etkisi incelenmiş ve ikinci aşama için başlangıç değerleri



Şekil 1. Robotik frezeleme ünitesi. (Robotic milling unit)

belirlenmiştir. Buradaki değerlendirmede yüzey pürüzlülüğü, yüzeyde bırakılan artık gerinme ve kesici ucun kesme ısısından etkilenen bölgesinin genişliği dikkate alınmıştır. Sabit bir nozul-takım ucu mesafesinde, hava basıncının yağ parçacıklarının boyutunu etkilediği bilinmektedir [14]. Yağlama miktarı ve takımın ucundan soğulan kesme ısısı yağlayıcının akış oranına bağlıdır. Burada, yağ-hava oranı dakikadaki atış sayısına bağlıdır. Bununla birlikte, püskürtülen yağın kesici takım – talaş arasına girebilmesi için yeterli süre püskürtülmelidir. Burada, kesici takım – talaş arayüzü, Şekil 2’de gösterildiği gibi, açılıp kapanan bir apertüre benzetilebilir. Buradaki açılış kapanış zamanı, radyal kesme derinliği, b, ve dış geçiş frekansına bağlıdır.



Şekil 2. MQL spreylemede kesici ağız – talaş arayüzünün gösterimi.

(Demonstration of cutting flute – chip interface in MQL spray.)

Takımın bir tam dönüşünü t_1 ile t_5 zamanlarında gerçekleştirdiğini düşünürsek, kesici takım – talaş arayüzü, kesicinin iş parçasıyla temas ettiği t_2 ve t_4 süreleri arası kapalıdır. MQL yağının t_1 ile t_3 zaman aralığında püskürtüldüğü düşünülürse, etkili bir yağlama için MQL zamanlamasının önemli olduğu sonucuna varılabilir. Bu değerlendirmeler çerçevesinde birinci aşama deneyleri,

Tablo 1’de verilen şartlarda gerçekleşmiştir. Deneysel şartlar, G1, G2 ve G3 olmak üzere üç grupta değerlendirilebilir. G1:[1, 2, 3, 4], G2:[2, 6, 7], G3:[2, 5] deneyleri sırasıyla yağ akış oranı, hava akış oranı ve hava basıncının etkisini incelemek amacıyla belirlenmiştir. Deney 8 ise, karşılaştırma yapabilmek için kuru kesme şartlarında gerçekleştirilmiştir.

MQL uygulamasında kullanılan yağlar, sentetik esterler ve yağ bazlı alkoller olmak üzere iki ana gruba ayrılabilir. Aynı zamanda bitkisel yağlar olarak da bilinen sentetik esterler iyi yağlama özellikleri göstermekle birlikte yüksek parlama ve buharlaşma noktasına sahiptirler. Bu sebeple, MQL uygulamalarında genellikle kullanımları yaygındır. Öte yandan, yağ bazlı alkoller tipi MQL sıvıları daha iyi ısı bertaraf özelliği gösterirken parça yüzeyinde bir miktar artık bırakabilirler. Bu sebeple, sentetik esterler genellikle daha çok yağlama gerektiğinde kullanılır. Yağ bazlı alkoller ise ısı bertaraf etmek istendiğinde gerektiğinde kullanılır.

Bu iki yağ tipinin, östenitli paslanmaz çeliklerin frezelemesinde ve MQL uygulamasındaki performansları henüz tam olarak bilinmemektedir. Bu sebeple, ikinci aşama deneylerde MQL yağlarının takım ömrü ve takım aşınması gelişimi etkisi incelenmiştir. Bu aşamadaki deneylerde kullanılan yağ tipleri Tablo 2’de verilmiştir.

3. DENEYSEL YÖNTEM (EXPERIMENTAL APPROACH)

Bu bölümde, gerçekleştirilen kesme testlerinde takip edilen deneysel yöntem ve deneysel sonuçların gözlemlenme yaklaşımı açıklanmıştır. İlk olarak kesme parametrelerinin nasıl seçildiği, sonrasında da takım aşınması ve ömrünün değerlendirilme yolu anlatılmıştır. Deneyler iki aşamada gerçekleştirilmiştir. Birinci aşamada, frezeleme için en uygun MQL şartları belirlenmiştir ve ikinci aşamada farklı yağlar kullanılarak takım aşınma testleri gerçekleştirilmiştir.

Tablo 1. Birinci aşamadaki deney şartları. (Cutting conditions for the first phase experiments.)

Deney	1	2	3	4	5	6	7	8
Çalışma frekansı (atım/min)	240	60	30	15	60	60	60	Kuru
Yağ akışı (ml/h)	600	280	140	75	280	280	280	Kuru
(ml/atım)	0,04	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	Kuru
Hava basıncı (bar)	6	6	6	6	7	6	6	Kuru
Hava valf seviyesi	9	9	9	9	9	5	2	Kuru

Tablo 2. İkinci aşama deneylerde kullanılan yağ tipleri. (MQL oil types used in the second phase of experiments.)

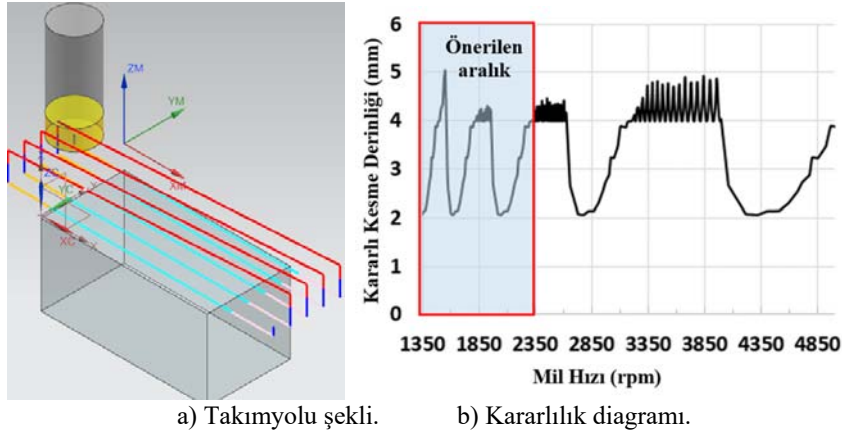
No	Yağ İsmi	Tipi	40°C’de akışkanlık	Parlama Noktası (°C)
1	CIMCOOL XE15/02	Bitkisel	40 cSt	220
2	CIMCOOL XE15/03	Yağ bazlı alkol	50 cSt	170
3	CIMCOOL XE15/04	Sentetik ester	20 cSt	240
4	Houghton V30ML	Çözünebilir bitkisel ester	32 cSt	230
5	Houghton PNZ	Mineral	30 cSt	150
6	Unilube	Su bazlı sentetik	8,2 cSt	93

3.1. Birinci aşama kesme deneyleri (First phase cutting tests)

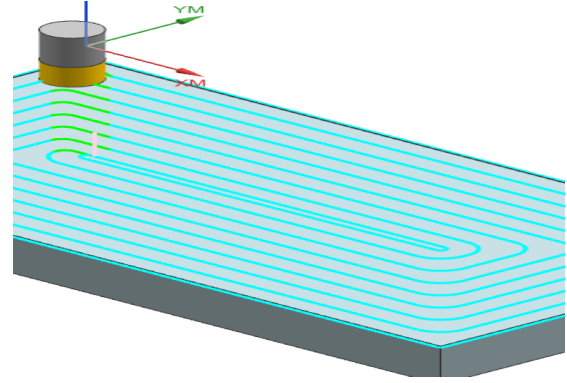
Birinci aşama kesme deneylerinde AISI 316L paslanmaz çeliği, 25 mm çapında üç ağızlı takım ile frezelenmiştir ancak kesme sırasında değişkenliğe sebep olmaması ve incelenecek kesici uç miktarını azaltmak amacıyla takım üzerinde yalnızca tek ağıza kesici kenar takılı olarak testler gerçekleştirilmiştir. Kesme testleri sırasında Sandvik markasına ait R390-11 T3 08E-ML kodlu ve 1040 seviye kaplamalı kesici uçlar kullanılmıştır. Temsili bir kaba talaş kaldırma operasyonu şartlarını sağlamak amacıyla %50 yanal kayma seçilmiştir ve testler aşağı kesme şartlarında gerçekleştirilmiştir. Birinci aşama testlerde 50 mm x 110 mm alana sahip numuneler, Şekil 3a'da görülen takım yolu geometrisine göre frezelenmiştir. Kesme hızı, takım imalatçısının da tavsiyesine göre 100 – 150 m/dk aralığında (1300 devir/dk – 1900 devir/dk bölgesi) seçilmiştir. Şekil 3b'de verilen kararlılık diagramına göre bu hız aralığında frezleme kararlılığı için robotun düşük frekanstaki modları baskındır ancak göreceli yüksek hızlarda kesici takımın modunun kararlı kesme koşullarını belirlediği görülmektedir. Robotun dinamik modlarını tahrik etmemek için 1800 devir/dk (140m/dk) hızı belirlenmiştir. Kesme derinliği 2 mm ve diş başı ilerleme 0,1mm/dönüş olarak belirlenmiştir. Bu şartlara göre bir numunenin frezelenmesi 2,5 dakika zaman almaktadır. Nozul ve takım ucu mesafesi de, yağ spreyinin görsel olarak gözlemlenmesine göre 30 mm olarak ayarlanmıştır.

3.2. İkinci aşama kesme testleri (Second phase cutting tests)

İlk aşamada, tercih edilebilecek MQL parametreleri belirlendikten sonra ikinci aşamada takım ömrü incelemesi gerçekleştirileceği için daha büyük bir numune üzerinde kesme testleri gerçekleştirilmiştir. Bu testlerde, kesme devamlılığını sağlamak için Şekil 4'te gösterildiği gibi dışarıdan içeriye doğru daralan paralel dikdörtgenler şeklinde bir takım yolu seçilmiştir. Burada numune boyutu 300 mm x 100 mm olarak belirlenmiştir. Kesme hızı ve ilerleme miktarı birinci aşamadaki değerlerle aynı tutulmuştur.



Şekil 3. Birinci aşama kesme testleri takım yolu ve parametre seçimi.
(Tool path and cutting parameter selection for first phase of experiments)



Şekil 4. İkinci aşama kesme testlerinde oluşturulan takımyolu.

(Tool path for the second phase of experiments.)

3.3. Yüzey bütünlüğü ölçümü (Measurement of surface integrity)

Kesme testlerinden sonra gerekli görülen bölgelerde ve numunelerde Keyence VK-X200 3 boyutlu confocal lazer tarama mikroskobuyla ölçülmüştür. Veri güvenilirliğini arttırmak için bir numune üzerinden 10 farklı bölgede toplam 4 mm² alan üzerinde ölçümler gerçekleştirilmiştir. Yüzeydeki artık gerinme ölçümleri yüzeydeki kenar ve orta bölgelerde gerçekleştirilmiştir. Birinci aşamadaki her numune üzerinde üç farklı alan ölçülerek ortalama değerler elde edilmeye çalışılmıştır.

3.4. Takım aşınmasının izlenmesi (Tool condition monitoring)

Birinci aşama testlerinde, 2,5 dakikalık kesim sonrası kesici takım üzerinde ısıdan etkilenen alının genişliği ve ilk aşınma bölgesi ölçülmüştür. İkinci aşamadaki kesme testleri sırasında takım üzerindeki aşınma bölgesi 5 dakikalık zaman aralıklarıyla gözlemlenmiştir. Kesici ağzının boşluk yüzeyindeki aşınma bölgesi, Şekil 5'te gösterildiği gibi çeşitli alanlara ayrılmıştır. Burada, VB ile gösterilen bölge kesici takım üzerindeki minimum aşınma genişliği, VBmax ile gösterilen mesafe, çentik aşınma genişliğidir. Bu çalışmada, genellikle çentik tipi aşınma gözlemlendiğinden sadece VBm üzerinden karşılaştırma yapılmıştır.



Şekil 5. Takım aşınması gösterimi ve ölçülen değerler.
(Demonstration of tool wear and measured wear land.)

4. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (EXPERIMENTAL RESULTS AND DISCUSSION)

Bu bölümde, deneysel sonuçlar verilerek bu sonuçlar tartışılmış ve ilgili yorumlara yer verilmiştir. İlk olarak, birinci aşamadaki deneylerin sonuçları değerlendirilmiş ve MQL uygulaması için hangi şartların tercih edilebilir olduğu belirlenmiştir. Ardından, MQL ile frezelemede takım aşınması ve takım ömrü üzerinde MQL yağlarının etkisinin belirlenmesi için ikinci aşama testlerin sonuçları verilerek, gerekli değerlendirmeler yapılmıştır.

4.1. Birinci aşama deneylerin sonuçları (Results of first phase experiments)

Birinci aşama deneylerin sonuçlarına göre MQL ayarlarının frezeleme performansına yani yüzey pürüzlülüğü, yüzeydeki artık gerinme ve kesici ucun kesim sonrası durumu, etkisi değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, MQL ayarlarının yüzey pürüzlülüğünü etkisinin kısıtlı derecede etkilediği, yüzeydeki artık gerinmeyi önemli ölçüde değiştirebileceği ve takımdaki ilk aşınma alanını ve ısıdan etkilenme bölgesini ciddi ölçüde etkileyebileceği

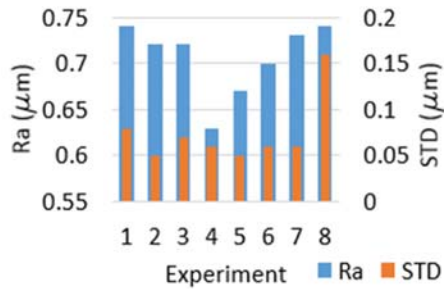
gözlemlenmiştir. Bu yorumlarla ilgili detaylı inceleme bu bölümün devamında verilmiştir.

4.1.1. MQL ayarlarının yüzey pürüzlülüğüne etkisi (Effect of MQL settings on surface roughness)

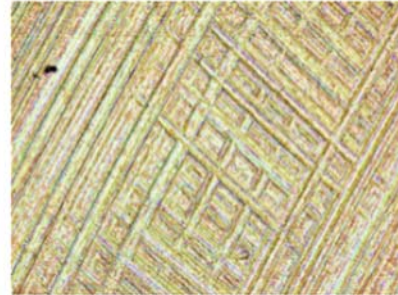
Testlerde yüzey ölçümü yapılan numunelerde pürüzlülük, genel anlamda iyi seviyelerde gözlemlenmiştir. Sekiz farklı koşulda gerçekleştirilen teste ait ortalama yüzey pürüzlülüğü değeri ve standart sapma değerleri Şekil 6a'da gösterilmiştir. Buna göre, en iyi ($0,62 \mu\text{m}$) ve en kötü ($0,74 \mu\text{m}$) ortalama yüzey pürüzlülüğü değeri arasında $0,12 \mu\text{m}$ civarında fark görülmekle birlikte, Test 4'te yani dakikada en düşük çalışma frekansı ve hava akış miktarının en çok olduğu durumda yüzey pürüzlülüğü en iyi çıkmıştır. Kuru kesme ve en yüksek çalışma frekansı durumunda yüzey pürüzlülüğü kötüleşmiştir. Bununla birlikte, kuru kesme şartlarında yüzey pürüzlülüğündeki standart sapma da artmıştır. Buna göre, MQL kullanımının, kuru kesmeye göre yüzey pürüzlülüğünü iyileştirdiği, çalışma frekansının az ve hava akışının yüksek olmasının yüzey pürüzlülüğüne ciddi değilse de olumlu etki yaptığı değerlendirilebilir. Test 1, Test 4 ve Test 8 için çekilen yüzey fotoğrafları sırasıyla Şekil 6b'de, Şekil 6c'de ve Şekil 6d'de gösterilmiştir. Burada görüldüğü üzere, yüzey pürüzlülüğü ölçümü yapılabilmesi için parça üzerinde ilgili alanlardan ilerleme izlerinin keskin olarak görüleceği görüntüler elde edilmiştir.

4.1.2. MQL ayarlarının artık gerinmeye etkisi (Effect of MQL settings on residual stresses)

Artık gerinimi ölçülen numuneler, 60 MPa 'dan düşük değişkenlik göstererek genel anlamda tutarlı değerler sergilemiştir. Ölçülen en yüksek ortalama asal gerilme, P1,



a) Ra ve STD



b) Örnek 1



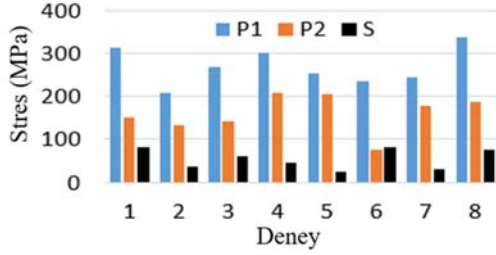
c) Örnek 4



d) Örnek 8

Şekil 6. İş parçası yüzeylerinin temsili karşılaştırılması (Her görüntü alanı, $710 \times 531 \mu\text{m}^2$).
(Representative comparison of the workpiece surface- all picture represent an area of $710 \times 531 \mu\text{m}^2$)

P2 ve en yüksek ortalama kesme gerilimi, S, Şekil 7’de verilmiştir. Test 1, 3 ve Test 4’te görülen göreceli yüksek değerlerin MQL ayarlarındaki düşük çalışma frekansına ve düşük yağ akış oranına bağlanabilir. Test 2, Test 3 ve Test 4 karşılaştırıldığında, yağ akışı azaldıkça yüzeydeki gerininin arttığı görülmektedir. Bu değerlendirmeye göre, kesici kenar ve malzeme arasında daha fazla yağ sağlandıkça kesim sırasındaki ısıl değişimin dengelendiği ve yüzeydeki artık gerininin azaldığı söylenebilir. Test 5, Test 6 ve Test 7 arasındaki karşılaştırma göstermektedir ki hava akışının yüzeydeki artık gerinmeye etkisi yok denecek kadar azdır. Bunun temel sebebi olarak, hava miktarının kesme sırasındaki sıcaklık dağılımını eşitlemekte etkisi kalmaması olarak belirtilebilir. Bununla birlikte, kuru kesme şartlarında gerçekleştirilen Test 8, en yüksek artık gerinme değerine sahip durumdur. Bu gözleme ve daha önceki testlerle ilgili yorumlara da bakılarak söylenebilir ki MQL kullanımıyla yüzeydeki artık gerininin iyileştirilebilmektedir. Ayrıca, yüzeydeki artık gerininin azaltılabilmesi için uygun MQL şartlarının araştırılması da önemlidir.



Şekil 7. Deneyler arası yüzeydeki artık gerininin değişimi. (Variation of surface residual stress among cutting tests.)

4.1.3. MQL ayarlarının kesici takım durumuna olan etkisi (Effect of MQL settings on tool condition)

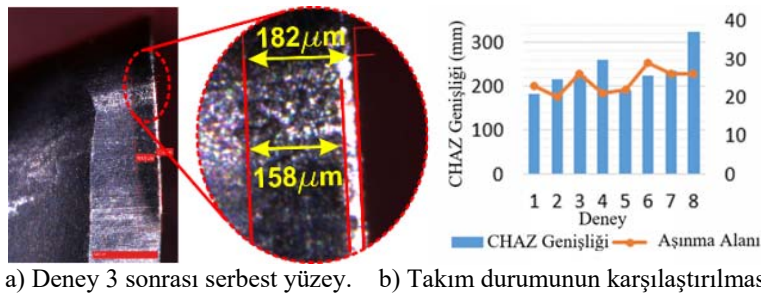
Birinci aşamadaki her test yeni kesici ağız ile gerçekleştirilmiştir ve sonrasında kesici ağız üzerinde kesme ısısından etkilenen bölgenin genişliği ve ilk aşınma genişliği, Şekil 8a’da gösterildiği gibi fotoğraflanmıştır. Kesici kenar üzerinde yapılan bu optik ölçümlerin sonuçları Şekil 8b’de karşılaştırılmıştır. Buna göre, kesici kenar üzerindeki ilk aşınma bölgesi, MQL ayarlarına göre ciddi bir değişiklik göstermemiştir ve genellikle 20 ila 30 μm arasında ölçülmüştür. Oysaki kesme ısısından etkilenen alanın genişliği, kontrol edilen MQL ayarlarına göre önemli değişim göstermiştir. Kuru kesme koşullarında, kesme ısı

takımın boşluk yüzeyinde 324 μm ile en büyük genişliği, yağ akış miktarının en yüksek olduğu (Test 1) koşuldaysa 182 μm ile en az genişliği etkilemiştir. Yağ akış oranının 600 ml/h değerinden 74 ml/h değerine düşürülmesi, ısıdan etkilenen bölgenin genişliğini 182 μm mertebesinde 260 μm mertebesine yükseltmiştir. Test 2, Test 6 ve Test 7 karşılaştırıldığında hava akış oranının bu bölgedeki genişliği ciddi olarak etkilemediği gözlemlenebilmektedir. Buradaki temel sebebin, bir önceki bölümde yüzey artık gerinmesindeki etkiyle aynı yönde olduğu söylenebilir. Hava basıncının 6 bar’dan 7 bar’a yükseltildiğinde ısıdan etkilenen bölge genişliği 217 μm değerinden 190 μm değerine düşmüştür. Buradaki temel mekanizmanın, artan hava basıncıyla yağın daha küçük parçacıklara ayrılması, bu parçacıklarının takım yüzeyine yapışmanın ve talaş-takım arası bölgeye daha iyi nüfuz edebilmesi olduğu değerlendirilebilir.

Yağ akış miktarının takım aşınması üzerinde etkili olduğu Şekil 8b’de Test 1 ve Test 3 karşılaştırması yapılarak görülebilmektedir. Yağ akış oranının takım aşınmasına olan uzun vadeli etkisinin ilk aşamada görülebilmesi için Test 1’e ve Test 3’e ait değerlerden de yola çıkarak bu testler 20 dakika boyunca sürdürülmüştür ve kesici kenarın durumu incelenmiştir. Bu testlerin sonucunda, kesici takımın boşluk yüzeyinde ve talaş yüzeyinde meydana gelen aşınmadaki fark Şekil 9’da açıkça görülmektedir. Test 1’deki şartlarla 20 dakika boyunca kesim gerçekleştirildikten sonra kesici kenar oldukça iyi görünümdeyken, Test 3’deki şartlarda takım aşınması ilerlemiştir. Bu ilk sonuca bakarak, özellikle yağ akış miktarının ve çalışma frekansının takım aşınmasındaki gelişime etkisi oldukça yüksektir.

4.1.4. Birinci aşama deneylerin yorumlanması (Discussion of first phase experiments)

Birinci aşama testlerde, AISI 316L tipi paslanmaz çeliğin robotik frezeleme sırasında, MQL ayarlarının yüzey bütünlüğü ve takım aşınması durumuna olan etkisi incelenmiştir. Çalışma frekansı, yağ akış oranı, hava akış oranı ve hava basıncı gibi yağlama şartları, deney tasarımına göre, değiştirilerek deneyler tasarlanmıştır. Deneysel sonuçlar göstermiştir ki MQL ayarları, yüzey pürüzlülüğünü ciddi anlamda etkilememektedir. Ancak yüzeydeki artık gerinme ve takım durumu bu tip ayarlardan oldukça fazla etkilenmektedir. Artık gerinme, yağ akışını kontrol ederek azaltılabilir ancak hava akış hızının bu sonuca etkisi yok



Şekil 8. MQL ayarlarının takım durumuna etkisi. (Effect of MQL settings on tool wear condition)

denecek kadar azdır. Takım durumu ele alındığında görülmektedir ki yağlama ayarları, takım aşınmasında ciddi rol oynamaktadır. Bu yönde en önemli parametrenin MQL sistemindeki çalışma frekansı olduğu gözlemlenmiştir. Artan çalışma frekansı ile, takım-iş parçası arasında daha fazla yağ verildiği için kesim bölgesinden atılan ısı miktarı da artmaktadır. Böylece, kesici takımın kesme ısısından etkilenmesi azalmaktadır, bununla birlikte kalınlaşan yağ tabakasının da adeta bir ısı bariyeri görevi görmesiyle ya da yağın yanmasıyla kesme ısısının kesici ağıza aktarımını azalttığı da düşünülebilir.

4.2. İkinci aşama deneylerin sonuçları (Results of second phase experiments)

Birinci aşama deneylerinde kullanılabilir olarak belirlenen MQL şartları ikinci aşama deneylerinde uygulanmıştır ve bu şartlar değiştirilmeden farklı tipteki MQL yağlarının takım aşınmasına ve ömrüne olan etkisi incelenmiştir. Bu bölümde, AISI 316L malzemeler üzerinde gerçekleştirilen takım ömrü testlerinin sonuçları verilmiştir ve tartışılmıştır. Bu çalışmada, takım ömrü testlerinden elde edilen aşınma değerleri hızlı ilk aşınma, düzgün (kararlı aşınma) ve hızlı son aşınma evreleri olarak ele alınmıştır. Böylece farklı MQL yağlarında bu evrelerin süreleri hakkında da fikir sahibi olunmuştur.

Takım ömrünün değerlendirilmesi için deney yaklaşımında anlatılan takım yolu boyunca frezeleme gerçekleştirilmiştir ve yaklaşık olarak 4 dakikada bir kesici takımın boşluk yüzeyindeki aşınma ölçülmüştür. Takım aşınması profili, (i) kararlı aşınma değeri (ii) kararlı aşınma değerine çıkış süresi, (iii) takım ömrü, gibi yönlerden yorumlanmış ve

karşılaştırılmıştır. Bu çalışmada değerlendirilen yağlar, farklı kimyasal ve fiziksel özellikler gösterdiğinden yağlama ve soğutma performanslarının da değişkenlik göstermesi beklenir. Bu sebeple, test sonuçların karşılaştırmalarından elde edilen yorumlar yağların kimyasal ve fiziksel özellikleriyle de ilişkilendirilmeye çalışılmıştır.

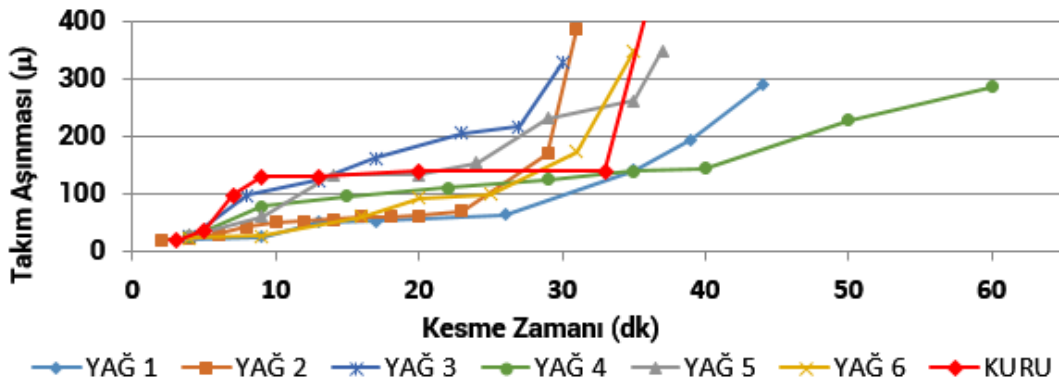
4.2.1. AISI 316L malzemesi için takım ömrü testleri (Tool life tests on AISI 316L)

AISI 316L malzeme üzerinde gerçekleştirilen frezeleme kesimlerinden elde edilen, takımın zamana bağlı aşınması Şekil 10'da gösterilmiştir. Burada, baz karşılaştırma kuru kesme koşullarına göre yapılmıştır. O sebeple, öncelikle kuru kesme şartlarındaki takım aşınma değişimi yorumlanmıştır ve sonrasında farklı MQL yağlarıyla elde edilen veriler karşılaştırılmıştır.

Kuru kesme şartlarındaki aşınma değişimi incelendiğinde ilk 10 dakika içerisinde doğrusal bir şekilde 100 µm seviyelerine kadar çıkan aşınma, yaklaşık 32 dakika boyunca sabit kalmış ve sonrasında kesici ucun katastrofik olarak zarar görmesiyle test sonlandırılarak kuru kesme şartlarındaki takım ömrü 32 dakika olarak değerlendirilmiştir. Yağ 1 kullanıldığında, boşluk yüzeyindeki aşınma, oldukça yavaş bir hızla artarak ilk yarım saatin sonuna 100 µm seviyelerine ulaşmaktadır. Sonrasında da neredeyse iki katı hızla 44. dakikada 300 µm seviyesine çıkmıştır ve takım ömrü belirlenmiştir. Kuru kesme ile karşılaştırıldığında takım üzerindeki aşınmanın çok daha yavaş geliştiği görülmektedir. Yağ 2 ile elde edilen aşınma grafiği, Yağ 1 ile benzerlik gösterse de 25. dakikadan sonra aşınma hızlanarak 30. dakikada 300 µm değerindeki



Şekil 9. 20 dakika sonra takım durumu. (Tool condition after 20 minutes of cutting.)



Şekil 10. AISI 316L malzemesi için takım aşınması (VBM). (Tool wear for AISI 316L material.)

aşınma seviyesine ulaşılmıştır. Yağ 3'ün hem takım ömrüne hem de aşınma hızına, kuru kesme şartlarına göre, olumlu bir etkisi gözlemlenmemiştir ve elde edilen takım ömrü kuru kesmeden daha kısa olarak gözlemlenmiştir. En uzun takım ömrü Yağ 4 ile 50 dk olarak gerçekleşirken, takım aşınması, bütün test boyunca az çok aynı hızda gözlemlenmiştir. Bu yönden, hem uzun takım ömrü hem de daha kararlı bir aşınma gelişimi izlendiği söylenebilir. Yağ 5 ve Yağ 6 ile

elde edilen takım ömrü, kuru kesme şartlarından farklı değildir. Yağ 5'deki takım aşınması kuru kesme şartlarına oldukça yakın izlenirken, Yağ 6'daki aşınma kuru kesme şartlarına göre bariz şekilde yavaş gelişmiştir.

Takım ömrü deneylerinde kullanılan kesici uçların boşluk yüzeylerindeki aşınma durumu zaman göre değişimleri de Şekil 11'de gösterilmiştir. Aşınma karakteristiği

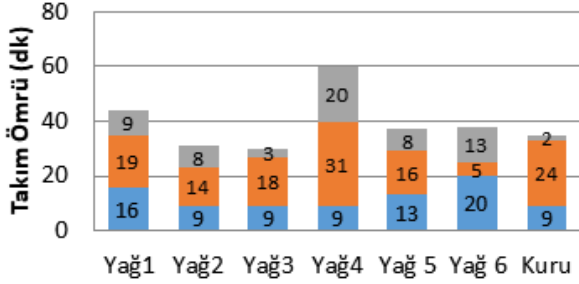
	YAĞ 1	YAĞ 2	YAĞ 3	YAĞ 4	YAĞ 5	YAĞ 6	KURU
Fotoğraf							
Zaman (dk)	4	4	4	4	4	4	4
Fotoğraf							
Zaman (dk)	9	8	9	9	9	9	9
Fotoğraf							
Zaman (dk)	13	12	13		14		13
Fotoğraf							
Zaman (dk)	17	16	17	17		16	
Fotoğraf							
Zaman (dk)	21	20	23	22	20	20	20
Fotoğraf							
Zaman (dk)	26	25	27		24	25	
Fotoğraf							
Zaman (dk)	35	31		30	30		32
Fotoğraf							
Zaman (dk)	39			40	35		38
Fotoğraf							
Zaman (dk)	44			50			

Şekil 11. AISI 316L malzemesi için takım aşınma görüntüleri. (Tool wear pictures for AISI 316L.)

incelendiğinde çoğunlukla çentik tipi aşınma gözlemlendiği ve kesici kenar malzemesinin fiziksel olarak ayrıldığı gözlemlenmektedir. Bu durum, AISI 316L tipi çeliklerin “strain hardening” özelliğiyle açıklanabilir. Yağ performansları bu fotoğraflara göre de farklı zaman dilimlerinde karşılaştırılmıştır.

İlk 9 dakika dikkate alındığında, sadece kuru şartlarda ve YAĞ 3 ile gerçekleştirilen frezelemede takımda bariz aşınma gözlemlenmiştir. Dakika 20’ye kadar YAĞ 3 hariç diğer yağlar yaklaşık benzer aşınma şekli göstermiştir. Dakika 30’dan öncesi takım durumu dikkate alındığında YAĞ 1, bütün yağlara göre en iyi performansı göstermiştir denebilir. Kuru kesme ve YAĞ 3 ile frezelemede ilk gözle görülür aşınma 9. dakikada gözlemlenmiştir.

Bu değerlendirmeye ilişkin olarak, kesme testlerinde kullanılan yağların üç aşınma evresine ait süreleri ve nihai takım ömürleri Şekil 12’te karşılaştırılmıştır.



Şekil 12. AISI 316L malzemesi için takım aşınma evreleri ve ömürleri.

(Tool wear phases and tool life for AISI 316L.)

Kuru frezeleme şartlarında hızlı aşınma evresi 9 dakika kadar gerçekleştikten sonra yaklaşık 24 dakika boyunca kararlı aşınma evresi gözlemlenmiştir. Takım ömrü tamamlanmadan önce çok kısa bir son aşınma dönemi izlenmiştir. YAĞ 1 ile yapılan teste ilk aşınma evresiyle kararlı aşınma evresi sırasıyla 16 dakika ve 19 dakika sürerek yaklaşık olarak zaman almıştır. Sonrasında yavaş bir son aşınma evresi yaşanmıştır. YAĞ 2, YAĞ 3 ve YAĞ 4 ile yapılan testlerde ilk aşınma evresi 9 dakika civarında gözlemlenmiştir. En uzun kararlı aşınma evresi YAĞ 4 ile gözlemlenirken, en uzun ilk aşınma evresi YAĞ 6 ile gözlemlenmiştir. Nihai olarak, en uzun takım ömrü YAĞ 4 ile elde edilirken, YAĞ 1’in sağladığı takım ömrü de kuru kesme şartlarına göre hissedilir derecede uzundur. YAĞ 2, YAĞ 3, YAĞ 5 ve YAĞ 6 ile elde edilen nihai takım ömürleri kuru kesme şartlarına yakındır. Ancak bunların arasında Yağ 5’in ve Yağ 6’nın daha sakin aşınma evreleri sağladığı söylenebilir.

5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışma, AISI 316L tipi paslanmaz çeliklerin MQL yağlama tekniğiyle frezelemesi sırasında oluşan takım aşınması ve buna bağlı takım ömrüyle beraber yüzeyde bırakılan artık gerinim değerlerinin incelenmesine

odaklanmıştır. Gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda MQL parametrelerinin süreç çıktılarına etkisi de incelenerek iyileştirilmiş şartlar belirlenmiştir. Frezeleme testleri, robotik frezeleme hücresinde gerçekleştirilmiştir.

Elde edilen sonuçlara göre MQL şartlarının takım aşınmasına ve yüzey bütünlüğüne önemli etkisi olduğu belirlenmiştir. Dakikada 15 vuruş ve 75 ml/h orandaki akışla en düşük yüzey pürüzlülüğü elde edilmiştir. Parça yüzeyinde bırakılan artık gerininin düşürülmesi içinse yüksek atım hızı ve yağlama oranının gerektiği gözlemlenmiştir. Bunun sebebi olarak, parçanın ısı şoklarına maruz kalmadan kararlı bir yağlama ortamında kesilmesi olarak belirtilebilir. Bununla birlikte, MQL yağlarının tipi de takım aşınması ve ömrünü önemli derecede etkilemektedir. AISI 316L tipi çeliğin MQL ile frezelemesinde en uzun takım ömrü, doğada çözünebilen bitkisel tabanlı yağ ile elde edilmiştir. Özellikle sentetik MQL yağlarının, AISI 316L tipi çeliğin kuru kesmeye göre takım ömrü açısından avantaj sağlamadığı gözlemlenmiştir. Özellikle su bazlı sentetik yağla gerçekleştirilen testlerde kararlı aşınma evresinin çok kısa olduğu bariz şekilde ortaya çıkmaktadır. Kesici takımlar üzerindeki zamana bağlı aşınma durumu karşılaştırıldığında çoğunlukla çentik tipi aşınmayla birlikte kesici takım üzerinde fiziksel kopmalar meydana gelmesi dikkat çekmektedir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Çalışmanın yazarı, bu araştırmanın gerçekleştirilmesinde ESPRC, The University of Manchester ve The University of Sheffield kurumlarının EP/J021172/1 numaralı araştırma, NNUMAN Programı kapsamındaki desteği için teşekkür eder. MQL yağlarının sağlanmasında CIMCOOL ve Houghton firmalarının desteğine de teşekkür edilmektedir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Weinert K., Inasaki I., Sutherland J.W., Wakabayashi T., Dry machining and minimum quantity lubrication. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 53 (2), 511-537, 2004.
- Shokrani A., Dhokia V., Newman S.T., Environmentally conscious machining of difficult-to-machine materials with regard to cutting fluids. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 57, 83-101, 2012.
- Rahman M., Kumar A. S., Evaluation of minimal lubricant in end milling. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 18 (4), 235-241, 2001.
- De Lacalle L.L., Angulo C., Lamikiz A., Sanchez J.A., Experimental and numerical investigation of the effect of spray cutting fluids in high speed milling. Journal of Materials Processing Technology, 172 (1), 11-15, 2006.
- Liao Y.S., Lin H. M., Mechanism of minimum quantity lubrication in high-speed milling of hardened steel. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 47 (11), 1660-1666, 2007.

6. Dhar N.R., Islam S., Kamruzzaman, M., Effect of minimum quantity lubrication (MQL) on tool wear, surface roughness and dimensional deviation in turning AISI-4340 steel. *Gazi University Journal of Science*, 20 (2), 23-32, 2007
7. Okada M., Hosokawa A., Asakawa N., Ueda, T., End milling of stainless steel and titanium alloy in an oil mist environment. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 74 (9-12), 1255-1266, 2014.
8. Abou-El-Hossein, K.A., Cutting fluid efficiency in end milling of AISI 304 stainless steel. *Industrial Lubrication and Tribology*, 60 (3), 115-120, 2008.
9. Thepsonthi T., Hamdi, M., Mitsui K., Investigation into minimal-cutting-fluid application in high-speed milling of hardened steel using carbide mills. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 49 (2), 156-162, 2009.
10. Zhong W., Zhao D., Wang X., A comparative study on dry milling and little quantity lubricant milling based on vibration signals. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 50 (12), 1057-1064, 2010.
11. Lawal S.A., Choudhury I.A., Nukman Y., Application of vegetable oil-based metalworking fluids in machining ferrous metals—a review. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 52 (1), 1-12, 2012.
12. Suda S., Yokota H., Inasaki I., Wakabayashi T., A synthetic ester as an optimal cutting fluid for minimal quantity lubrication machining. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 51 (1), 95-98, 2002.
13. Yıldırım Ç.V., Kivak T., Erzincanlı F., Uygur I., Sarıkaya M., Optimization of MQL Parameters Using the Taguchi Method in Milling of Nickel Based Waspaloy, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 30 (2), 173-186, 2017.
14. Mia M., Al Bashir M., Khan M.A., Dhar N.R., Optimization of MQL flow rate for minimum cutting force and surface roughness in end milling of hardened steel (HRC 40). *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 89 (1-4), 675-690, 2017.
15. Uysal, A., Investigation of flank wear in MQL milling of ferritic stainless steel by using nano graphene reinforced vegetable cutting fluid. *Industrial Lubrication and Tribology*, 68 (4), 446-451, 2016.
16. Al Bashir M., Mia M., Dhar N.R., Investigations on surface milling of hardened AISI 4140 steel with pulse jet MQL applicator. *Journal of the Institution of Engineers (India): Series C*, 1-14, 2018.
17. Su Y., Gong L., Li B., Liu Z., Chen D. Performance evaluation of nanofluid MQL with vegetable-based oil and ester oil as base fluids in turning. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 83 (9-12), 2083-2089, 2016.
18. Songmei Y., Xuebo H., Guangyuan Z., Amin M., A novel approach of applying copper nanoparticles in minimum quantity lubrication for milling of Ti-6Al-4V. *Advances in Production Engineering & Management*, 12 (2), 139, 2017.

