



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC



Molibden ve alaşımlarının frezelenmesinde takım aşınmasının incelenmesi

Investigation of tool wear when milling molybdenum and its alloys

Yazar(lar) (Author(s)): Hüseyin GÖKÇE¹, İbrahim ÇİFTÇİ²

ORCID¹: 0000-0002-2113-1611

ORCID²: 0000-0001-7875-6324

To cite to this article: Gökçe H. ve Çiftçi İ., “Molibden ve alaşımlarının frezelenmesinde takım aşınmasının incelenmesi”, *Journal of Polytechnic*, 27(3): 839-847, (2024).

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz: Gökçe H. ve Çiftçi İ., “Molibden ve alaşımlarının frezelenmesinde takım aşınmasının incelenmesi”, *Politeknik Dergisi*, 27(3): 839-847, (2024).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.1215548

Molibden ve Alaşımlarının Frezelenmesinde Takım Aşınmasının İncelenmesi

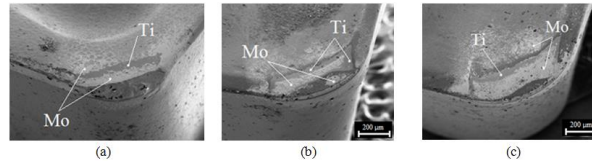
Investigation of Tool Wear When Milling Molybdenum and Its Alloys

Önemli noktalar (Highlights)

- ❖ Saf molibden, TZM ve MHC alaşımlarının frezelenmesi (Milling of pure molybdenum, TZM and MHC alloys)
- ❖ Takım aşınması ve takım ömrünün incelenmesi (Investigation of cutting tool wear and tool life)
- ❖ Kesici takım aşınmasının SEM ve EDX analizi (SEM and EDX analysis of cutting tool wear)

Grafik Özet (Graphical Abstract)

Bu çalışmada ticari saf molibden, TZM ve MHC frezeleme metodu ile şekillendirilmesi sürecinde meydana gelen takım aşınmaları incelenmiştir. Çalışma sonucunda aşınan kesici takımların dijital ve SEM ile aşınma görüntüleri alınmış ayrıca EDX ile de aşınmış kesici takımlar incelenmiştir. / In this study, tool wear during the milling process of commercial pure molybdenum, TZM and MHC was investigated. As a result of the study, wear images of the worn cutting tools were taken with digital and SEM, and the worn cutting tools were examined with EDX.



Şekil. SEM görüntüsü a) Mo b) TZM c) MHC ($\times 150$) / **Figure.** SEM image a) Mo b) TZM c) MHC ($\times 150$)

Amaç (Aim)

Bu çalışmada, saf molibden, TZM ve MHC alaşımlarının alın frezelenme sürecinde karbür kesici takımlarda meydana gelen aşınmalar ve kesici takım ömürlerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. / In this study, it is aimed to determine the wear and cutting tool life in face milling of pure molybdenum, TZM and MHC alloys.

Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

Öncelikle en iyi yüzey pürüzlülük değerlerinin elde edildiği kesici takım ve kesme parametreleri tespit edilmiş. Deneyler sonucunda aşınan kesici takımların dijital ve SEM ile aşınma görüntüleri alınmış ayrıca EDX ile de aşınmış kesici takımlar incelenmiştir. / Initially, the cutting tool and cutting parameters leading to the high surface quality were determined. As a result of the experiments, wear images were taken by digital and SEM. Also, worn cutting tools were investigated with EDX.

Özgünlük (Originality)

Literatür incelendiğinde ticari saflıktaki molibden üzerine sınırlı da olsa güncel uluslararası çalışmalar yapıldığı ama molibden alaşımları üzerine daha az yayının olduğu görülmüştür. / When the literature is examined, it is seen that there are limited current international studies on commercial purity molybdenum and less publication on molybdenum alloys.

Bulgular (Findings)

Her üç malzeme gurubunda da kesici takımlarda hızlı aşınmalar gözlemlenmiştir. Kesici takım aşınma türü olarak saf molibden için yan yüzey aşınması, TZM ve MHC alaşımlarında ise krater aşınması olduğu tespit edilmiştir. / Rapid wear on cutting tools was observed in all three material groups. It was seen that flank wear was observed on the cutting tool for pure molybdenum, while crater wear was observed for TZM and MHC alloys.

Sonuç (Conclusion)

Saf molibdenin işlenmesi sürecinde iş parçası malzemesi kesici takım üzerine yapışma eğilimine girmiştir. TZM ve MHC alaşımlarının işlenmesinde oluşan krater aşınması, kesici takım üzerindeki kaplamanın kesintili kesmeden dolayı kırılması ve molibdenin kesici takım malzemesi ile etkileşime girerek olduğu kanaatine varılmıştır. / During the face milling of pure molybdenum, the workpiece material was seen to adhere to the cutting tool. It was concluded that crater wear caused by milling of TZM and MHC alloys, breakage of coating on cutting tool due to interrupted cutting and due to molybdenum interacting with cutting tool material.

Etik Standartların Beyanı (Declaration of Ethical Standards)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler. / The author(s) of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.

Molibden ve Alaşımlarının Frezelenmesinde Takım Aşınmasının İncelenmesi

Araştırma Makalesi / Research Article

Hüseyin GÖKÇE^{1*}, İbrahim ÇİFTÇİ²

¹Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Çankırı Karatekin Üniversitesi, Türkiye

²Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Çankırı Karatekin Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received : 06.12.2022 ; Kabul/Accepted : 05.01.2023 ; Erken Görünüm/Early View : 31.01.2023)

ÖZ

Verimliliğin öneminin arttığı günümüz dünyasında, üstün özelliklere sahip mühendislik malzemelerinin istenilen kalitede ve en uygun şartlarda şekillendirilebilmeleri büyük önem kazanmıştır. Refrakter metallere olan molibden ve alaşımları, yüksek sıcaklık uygulamaları için uzay, havacılık, savunma ve biyomedikal gibi ileri teknolojilerin kullanıldığı sektörlerde bütünü en kritik parçalarının üretiminde yer bulan eşsiz malzemelerdir. Refrakter metaller zor işlenen malzemeler olarak bilinir ve bu malzemelerin birim maliyetleri nispeten yüksektir. Malzemelerin bu özellikleri işleme verimliliğini olumsuz etkilemekte ve üretim maliyetlerini artırmaktadır. Bu çalışmada saf molibden, TZM (Titanyum-Zirkonyum-Molibden) ve MHC (Molibden-Hafniyum-Karbon) alaşımlarının frezelenmesi sürecinde kesici takımlarda meydana gelen aşınmalar ve takım ömrü incelenmiştir. Deneysel çalışmada kesici takım ve kesme parametrelerinin belirlenmesinde literatürde yer alan çalışmalar dikkate alınarak optimum kesici takım ve kesme parametreleri belirlenmiştir. Deneyler sonucunda aşınan kesici takımların dijital ve taramalı elektron mikroskopları (SEM) ile aşınma görüntüleri alınmış ayrıca EDX ile de aşınmış kesici takımlar incelenmiştir. Her üç malzeme grubunda da kesici takımlarda hızlı aşınmalar gözlemlenmiştir. Saf molibdenin işlenmesinde yan yüzey aşınması görülürken, TZM ve MHC alaşımlarında krater aşınması dikkat çekici boyutlara ulaşmıştır. 4800 m³ talaş kaldırma miktarında yan yüzey aşınması saf molibdende 0,381 mm, TZM’de 0,072 mm, MHC’de 0,07 mm değerlerindedir, krater aşınması TZM’de 5,85 mm², MHC’de 8,348 mm² değerlerine ulaşmıştır. Saf molibdende ise krater aşınması görülmemiştir.

Anahtar Kelimeler: Molibden ve alaşımları, frezeleme, takım aşınması, takım ömrü.

Investigation of Tool Wear When Milling Molybdenum and Its Alloys

ABSTRACT

In our current world, where the importance of productivity increases, it is of great importance that the engineering materials with superior properties can be shaped in the desired quality and under the most favorable conditions. Molybdenum and its alloys, which are refractory metals, are among the unique materials found in the production of the most critical parts of the whole in high-tech applications such as space, aviation, defense and biomedical industries. Refractory metals are known as difficult-to-cut materials, and their unit costs are relatively high. These properties of materials adversely affect processing efficiency and increase production costs. In this study, wear and tool life of the cutting tools were examined during the milling operation of pure molybdenum, TZM (titanium-zirconium-molybdenum) and MHC (molybdenum-hafnium-carbon) alloys. In the experimental study, optimum cutting tools and cutting parameters were determined by considering the publications in literature. As a result of the experiments, wear images of the cutting tools were taken by digital and scanning optical microscopes (SEM). In addition, EDX analysis was also carried out on these cutting tools. In all three material groups, rapidly increasing wear was observed on the cutting tools. Flank wear was observed in machining of pure molybdenum while crater wear in was observed in machining of TZM and MHC alloys. At 4800 m³ metal removal rate, the flank wear was 0.381 mm for pure molybdenum, 0.072 mm for TZM, 0.07 mm for MHC, while crater wear reached 5.85 mm² for TZM and 8.348 mm² for MHC. No crater wear was observed in pure molybdenum.

Keywords: Molybdenum and its alloys, milling, tool wear, tool life.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Gelişen teknoloji ile beraber mühendislik malzemelerinden beklenen özellikler artmıştır. Çalışma ortamlarındaki sıcaklıklar artmış ve bu sıcaklıklarda çalışması istenen parçalardan beklenen özelliklerinde (kimyasal, mekanik ve geometrik) değişimin en az olması istenmektedir. Özellikle yüksek sıcaklık

değerlerindeki uygulamalarda ısıl genişlemenin düşük, ergime noktasının ve ısı iletiminin yüksek olması istenir. Arzu edilen bu özellikler refrakter malzemeleri tanımlamaktadır. Elementler tablosunda yer alan tungsten, tantalum, niobyum, renyum ve molibden bilinen refrakter elementlerdir. Molibden şekillendirme ve mekanik özellikleri bakımında nükleer, savunma, uzay ve elektronik sanayilerinde talebi gün geçtikçe artan refrakter malzemelerdendir [1]. 20. yy ortalarında yaklaşık 80 bin ton olan molibden üretimi 21. yy başlarında 250 bin tonun üzerindedir [2].

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : huseyingokce@karatekin.edu.tr

Molibdenin, yüksek yoğunluğa ($10,22 \text{ g/cm}^3$) sahip hacim merkezli kübik kristal (HMK) yapıda bir refrakter metaldir [3]. Yüksek sıcaklık mukavemeti ve yüksek sürünme direnci gibi kritik öneme sahip parçaların üretiminde yerini alan molibden ve alaşımları aydınlatma, malzeme şekillendirme (dövme), tıp endüstrisi, elektronik, kaplama, cam üretimi ve yüksek sıcaklık uygulamaları gibi alanlarda kullanılmaktadır [4]. Molibden, kalıp sektöründe de yüksek sıcaklık performansı ($\approx 2150^\circ\text{C}$) göz önüne alındığında kalıbın uzun süreli hizmet edebilmesini sağlayabilecek az sayıda mekanik özelliklere sahip malzemeden biridir [5]. Molibden ve alaşımları, toz metalurjisi ve döküm yöntemiyle üretilebilmektedir [6]. Yapılan araştırmalar, molibdenin çevreyi ve insan sağlığını olumsuz etkilemediğini belirtmektedir [7]

Hızla gelişen teknoloji ile beraber mühendislik malzemelerinin talaşlı imalat yöntemleri ile şekillendirilmesinde verimlilik göz ardı edilemez [8]. Aksi takdirde birim maliyetleri yüksek olan bu malzemelerin üretim maliyetlerini önemli ölçüde artırması kaçınılmazdır. Molibden refrakter metaller grubundadır ve refrakter metallerin işlenmesinin zor olduğu bilinmektedir [9]. Molibden ve alaşımlarının işlenebilirlikleri ile ilgili nispeten az sayıda ve güncel olmayan araştırmalar, bilim insanlarını bu konuda araştırma yapmaya yönlendirmiştir.

Kuljanic vd. işlenebilirliği düşük, zor işlenen bazı malzemeler üzerinde detaylı bir inceleme yapmışlardır. Alaşımlı çelikler, titanyum alaşımları, nikel esaslı süper alaşımlar ve bazı molibden alaşımlarının işlenebilirlik özelliklerini incelemiştir. Ticari saflıktaki molibdenin işlenebilirliğinde mikro yapının önemine vurgu yapmışlardır. Kuru şartlarda yaptıkları tormalama işlemlerinde kesme hızının artması ile yüzey pürüzlülüğünün düştüğünü, özellikle 150 m/dk kesme hızında en düşük pürüzlülük değerine ulaşıldığını ifade etmişlerdir. Ancak kesme hızının daha yüksek değerlere çıkartılması kesici takım ömrü üzerinde olumsuz etkiye neden olduğunu belirtmişlerdir. M15 karbür kalitesindeki TiAlN kaplamalı kesici takımın 200 m/dk kesme hızında 20 dakika boyunca etkin bir şekilde çalışacağına ortaya koymuşlardır [10].

Zlatin vd. birçok farklı refrakter malzemelerin işlenebilirliklerini incelemiştir. TZM alaşımı için tormalama, frezeleme, delme, raybalama, kılavuz çekme ve taşlama işlemleri için farklı koşullarda yapılan deneylerde elde edilen sonuçlara bu çalışmada detaylarıyla yer verilmiştir [11].

ED FAGAN şirketi tarafından yayınlanan bir çalışmada molibden ve alaşımlarının talaşlı üretim yöntemleri ile şekillendirilmesi rapor edilmiştir. Bu rapor kapsamında tormalama, frezeleme, delme, raybalama, vida çekme, taşlama, parlatma ve honlama süreçleri ele alınmıştır. Bu alaşımların talaşlı imalat ile şekillendirilmesinin diğer metallerin şekillendirilmesine benzediğini ve ayrıca her geometri ve toleransta işlem yapılmaya uygun olduğu belirtilmiştir. Yüksek hız çeliğine (HSS) nispeten karbür

kesici takım malzemelerinin iyi bir yüzey kalitesi sağlamak için kullanılması gerektiğine ancak her iki durumda da çelik alaşımlarında elde edilen takım ömründen daha kısa takım ömrü olacağına vurgu yapılmıştır. HSS takımlarla yapılan işlemlerde kaba yüzey kaliteleri elde edileceği, düşük pürüzlülük değerleri ve sıkı toleranslar için ise karbür kesici takımların kullanılmasının gerekli olduğu ifade edilmiştir [13].

Chandler (ASM Handbook 16 – Machining) kitabında, molibden ve alaşımlarının frezelenmesinde karbür takımlar (C2 kalite) kullanılması gerektiğine ve kesici takım geometrisinin dökme demir için kullanılan takım geometrisine benzerlik gösterdiğine yer vermiştir. Özellikle tormalama ve frezelemede nihai yüzeylerin elde edilmesinde karbür takımların, kaba tormalama, vida çekme, delme gibi işlemlerde ise HSS takımların kullanılabilmesine vurgu yapmıştır [14].

Mouralova vd. saf molibden malzemeyi $0,8 \text{ mm}$ çapında karbür freze ile en iyi yüzey kalitesi için kesme hızı, ilerleme miktarı ve kesici takım kaplama durumunu baz alarak mikro frezeleme işlemine tabi tutmuşlar ve aynı zamanda takım aşınmalarını incelemiştir. Yaptıkları toplam 26 deney sonucunda yüzey pürüzlülüklerini, yüzey morfolojisini, çapak oluşumunu ve takım aşınma durumlarını incelemiştir. Çalışma sonucunda optimum yüzey kalitesinin 80 m/dk kesme hızı ve $0,002 \text{ mm/diş}$ ilerleme miktarında kaplamasız takım ile elde edildiğini ifade etmişlerdir [15].

Bu çalışmada refrakter malzemeler grubunda yer alan saf molibden, TZM ve MHC alaşımlarının yüksek ve yeni teknolojilerin kullanıldığı havacılık, uzay ve savunma sanayileri gibi alanlarda kullanımı ve talebi gün geçtikçe artmaktadır. Literatür incelendiğinde ticari saflıktaki molibden üzerine sınırlı da olsa güncel uluslararası çalışmalar yapıldığı ama molibden alaşımları üzerine daha az yayının olduğu görülmüştür. Bu nedenle çalışma, saf molibden ve ticari olarak kullanımda olan molibden alaşımlarının (TZM ve MHC) farklı kesme parametreleri ve kesici takımla frezelemesi ile şekillendirilmesi sürecinde meydana gelen takım aşınmaları üzerindeki etkilerine odaklanmaktadır.

2. DENEYSEL METOD (EXPERIMENTAL METHOD)

Molibden, TZM ve MHC alaşımlarının alın frezelemesi ile işlenmesi sonucu kesici takımlarda meydana gelen aşınmalar, literatür araştırması sonucu elde edilen optimum yüzey pürüzlülük değerleri için kullanılan kesici takım ve kesme parametreleri kullanılarak incelenmiştir.

2.1. Deney Malzemeleri (Test Materials)

Molibden, uygulamalarda saf haliyle kullanıldığı gibi alaşımlanmış haliyle de kullanılır. Molibdenin birçok alaşımı olsa da en yaygın olarak TZM (Ti-Zr-Mo) ve MHC (Mo-Hf-C) alaşımları kullanılmaktadır. 21°C sıcaklıkta saf molibdenin çekme gerilmesi $\approx 800 \text{ MPa}$,

TZM alaşımının ≈ 850 MPa ve MHC alaşımının ≈ 890 MPa'dır [16]. Ayrıca MHC alaşımının 800°C 'de çekme gerilmesi (≈ 600 MPa), oda sıcaklığındaki 316L paslanmaz çeliğin çekme gerilmesinden (≈ 580 MPa) daha yüksek bir değerdedir [17]. Çizelge 1'de ticari saflıktaki molibden, TZM ve MHC alaşımının bazı özellikleri ve kimyasal kompozisyonu verilmiştir.

Bu çalışmada; ticari saflıktaki molibden, TZM (Ti-Zr-Mo) ve MHC (Mo-Hf-C) olmak üzere 3 farklı malzeme

kullanılmıştır. Malzemeler, fiyat araştırması ve analiz raporları dikkate alınarak temin edilmiş ve $50 \times 50 \times 5$ mm boyutlarında prizmatik parçalar hazırlanmıştır. Malzemelerin kimyasal bileşimlerini belirlemek için Thermo NITON XL3I cihazı ile XRF ölçümleri yapılmış ve sonuçlar Çizelge 2'de verilmiştir.

sürünme dayanımını TZM alaşımından daha yüksektir. Yeniden kristalleşme sıcaklığı 1550°C civarındadır. İzotermal dövme kalıpları, sıcak metal ekstrüzyon

Çizelge 1. Molibden, TZM ve MHC alaşımının kimyasal içeriği ve çeşitli özellikleri (Chemical composition and various properties of molybdenum, TZM and MHC alloys) [18]

Özellik	Birim	Saf Molibden	TZM	MHC
Kimyasal bileşim	%	>99,97 Mo	0,5Ti-0,08Zr-0,03C	1,2Hf-0,08 C
Yoğunluk (20°C)	g/cm^3	10,22	10,16	10,00
Ergime Noktası	$^\circ\text{C}$	2617	2620	
Brinell Sertliği	BH	205	212	225
Akma Gerilmesi	MPa	600	680	725
Çekme Gerilmesi	MPa	800	850	890
Elastikiyet Modülü	GPa	330	325	
Poison Oranı	-	0,38	0,38	
Isı iletim Katsayısı (20°C)	[W/(mK)]	138	140	
Kristal Yapı	-	HMK		

Çizelge 2. Deney malzemelerinin kimyasal bileşimi (Chemical composition of test materials)

Saf molibden (%)	TZM (%)	MHC (%)
Fe:0,105 Mo:99,32 Ru:0,109 Pd:0,168 Cd:0,126 Sn:0,025 Sb:0,102	Fe:0,332 Mo:97,13 Ni:0,078 Ti:1,08 Zn:0,011 Zr:0,543 Ru:0,135	Fe:0,205 C:0,103 Mo:97,28 Ti:0,238 Hf:0,815 Ru:0,416 Pd:0,196

Ticari saflıktaki molibden tel, şerit, çubuk veya levha şeklinde ısıtma gereçlerinin yapımında, yüksek sıcaklık fırınlarının kritik parçalarının (1700°C 'nin üzerine çıkılabilir) üretiminde kullanılır. Koruyucu atmosfer kullanılmazsa karbon ve oksijen ile etkileşime girer. Ayrıca bazı teknolojik zorluklara rağmen molibden gibi bazı refrakter metaller için üç boyutlu baskı teknolojileri geliştirilmiştir [19]. Elektrik ve elektronik endüstrileri için filaman, elektrot, lamba buvaları, valfler ve redresör lambalarının üretimlerinde yer alır [17]. Mükemmel özelliklerinden dolayı, molibden elektronik endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır [20]. Taramalı elektron mikroskobu gibi elektron ışını ve/veya yüksek enerji yoğunluklu teknolojilerin kullanıldığı cihazlarda molibden malzemenin üretilmiş nanometre boyutunda şekillendirilmesi gereken, oldukça hassas ve temiz yüzeylere sahip parçalar kullanılmaktadır. Telerezyon tezgâhları, çapaksız ve istenilen hassasiyette parçaların üretilmesine olanak sağlarlar [21].

TZM (%0,5-1,2 Ti ve %0,08-0,5 Zr), molibdene çok küçük miktarlarda titanyum ve zirkonyum ilavesi ile meydana gelir. 1200°C 'ye kadar olan sıcaklıklarda yüksek mukavemet ve sürünme direnci sağlar [22]. En yaygın molibden esaslı alaşım olarak bilinen TZM nükleer enerji ve havacılık sistemleri için bilinen en iyi refrakter alaşımlardan biridir [23]. Saf molibden ve TZM alaşımı malzemeler rotasyonlu sürünme kaynaklarında oldukça iyi sonuçlar vermektedir [24].

MHC %0,8-1,5 Hf, %0,05-0,15 C alaşım elementi ihtiva eden molibden alaşımıdır. Yüksek sıcaklık dayanımı ve

kalıplarında kalıp malzemesi olarak, bu kalıpların aksesuarlarının yapımında ve metal işleme takımlarında kullanılır [25]. MHC alaşımının yüksek sıcaklıklarda üstün mekanik davranışı, yapısındaki hafniyum karbürlerden kaynaklanır [26].

Deney numunelerinden hazırlanan $10 \times 10 \times 5$ mm ölçülerindeki örnekler $\varnothing 40$ mm çapında sıcak bakalıte alınmış ve mikroyapı incelemesi için yüzeyler zımparalama ve parlatma ($3 \mu\text{m}$ parlatma solüsyonları kullanılarak keçe üzerinde) süreçlerinden geçirilmiştir. Molibden ve alaşımının dağlanması için genellikle Murakami çözeltisi kullanılmaktadır [27]. Murakami dağlayıcısı ile 60 saniye süreyle dağlanan örnekler alkolle temizlenerek Leica DM 4000M metal mikroskobu ile mikroyapıları incelenmiştir.

2.2. Kesme Şartları ve Kullanılan Cihazlar (Cutting Conditions and Used Devices)

Molibden, TZM ve MHC alaşımının alın frezeleme yöntemi ile işlenmesi sonucu kesici takımlarda meydana gelen aşınmalar, literatür araştırması sonucu elde edilen optimum yüzey pürüzlülük değerleri için kullanılan kesici takım ve kesme parametreleri kullanılarak incelenmiştir. Yapılan çalışmada saf molibden, TZM ve MHC için alın frezeleme işlemleri sonucu oluşan yüzey pürüzlülük değerleri için en uygun kesici takım ve kesme parametresi optimizasyonu yapılmıştır. Kesici

takım, kesme hızı ve ilerleme miktarı kontrol faktörleri olarak belirlenmiş ve her kontrol faktörü için 4 farklı seviye seçilmiştir. Deney tasarımında Taguchi L16 dikey dizisi kullanılmıştır. Her malzeme için kesme kuvvetleri

ve yüzey pürüzlülük değerleri kalite karakteristiği olarak belirlenmiş ve kesici takım ve kesme parametrelerinin optimizasyonu için ayrı ayrı deneyler yapılmıştır [18].

Bu çalışmada, kesici takım ve kesme parametrelerinin seçiminde bu çalışmadan elde edilen optimum yüzey pürüzlülük sonuçları dikkate alınmıştır. Yapılan çalışma sonucu yüzey pürüzlülüğü için kontrol faktörlerinin optimum seviyeleri Çizelge 3’de verilmiştir. Aşınma deneylerinde kullanılan kesici takımlar ve takım

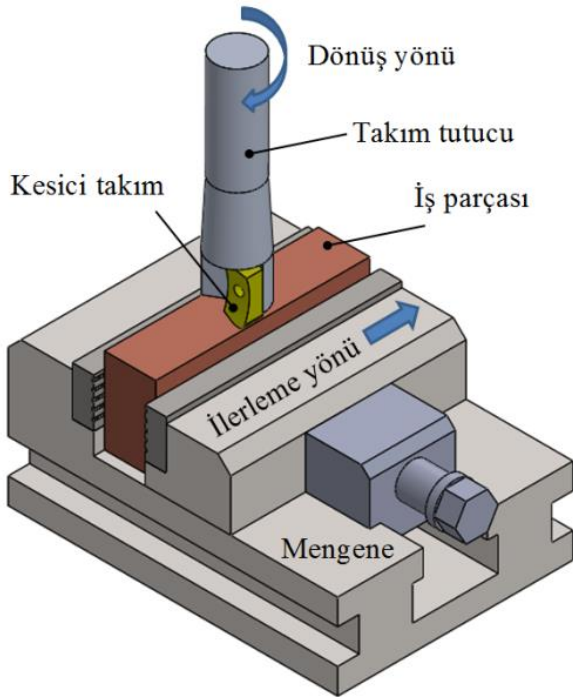
Deneyler kesme sıvısı kullanmaksızın Taksan TMC-500V CNC dik işlem merkezinde yapılmıştır. Şekil 1’de deney düzeneği şematik olarak verilmiştir. Takım aşınmasının gözlemlenmesi için led aydınlatmalı dijital bir mikroskop kullanılmıştır. Takım aşınma değerlerinin ölçülmesinde AutoCAD yazılımından yararlanılmıştır. Ayrıca kesici takım aşınmaları Carl Zeiss Ultra Plus Gemini FESEM taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile görüntülenmiş ve EDX analizi yapılmıştır.

Çizelge 3. Saf molibden, TZM ve MHC alaşımları için kontrol faktörlerinin optimum seviyeleri (Optimum levels of control factors for pure molybdenum, TZM and MHC alloys)

Malzeme	Kesici takım	Kesme hızı (m/dk)	İlerleme miktarı (mm/diş)
Saf molibden	4240	150	0,2
TZM	KC522M	150	0,15
MHC	KC522M	150	0,10

Çizelge 4. Kesici takımlar ve takım tutucuların özellikleri (Specifications of cutting tools and tool holders)

Takım markası	Takım kodu	Kalite sınıfı	Kaplama türü	Takım tutucu kodu
Kennametal	EDPT10T308 PDSRGE	KC522M	PVD (Al,Ti)N	12A01R020A16ED10
Sandvik	R390-11 T308M	4240	CVD (CVD Ti(C,N)+Al ₂ O ₃ +TiN)	R390-012A16-11L Coromill 390



Şekil 1. Deney düzeneği (Experimental setup)

sınırlarından oluştuğu (Şekil 2a), titanyum zirkonyum ilaveli molibden alaşımının (TZM) mikroyapı görüntüsünün (Şekil 2b) saf molibden mikroyapısı ile benzerlik göstermekle birlikte daha küçük tanelerin varlığı görülmektedir. Hafniyum karbon ilaveli molibden alaşımının (MHC) mikroyapı görüntüleri incelendiğinde ise (Şekil 2c) saf molibden ve titanyum zirkonyum molibden alaşımına göre daha karmaşık şekilli tanelerden oluştuğu görülmektedir.

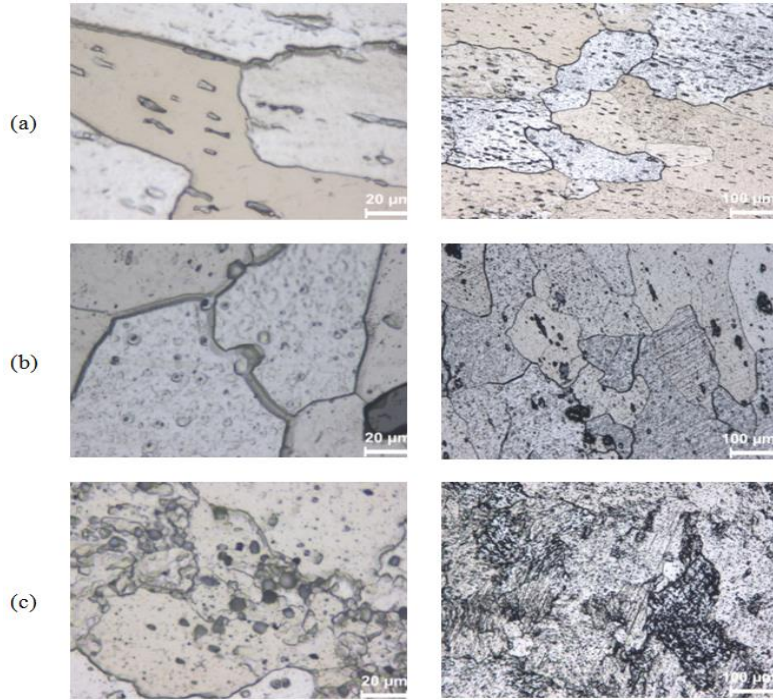
3.2. Takım Aşınması Analiz (Tool Wear Analysis)

Her malzeme gurubundan ilk olarak 1600 mm³ talaş kaldırılmış, aşınma tipi belirlenmiş ve aşınma değerleri ölçülmüştür. Deneyler sonucu saf molibden işlenmesinde kullanılan kesici takımda yan yüzey aşınması, TZM ve MHC alaşımlarının işlenmesinde kullanılan kesici takımlarda ise krater aşınması olmak üzere iki farklı aşınma tipi gözlemlenmiştir. Kesici takım aşınma değerleri AutoCAD programı kullanılarak belirlenmiştir. Kesici takım üzerinde ölçüsü kesin olarak bilinen bir geometrinin (kalınlık, uzunluk veya çap değeri) değeri baz alınarak orantı kurulmuştur. Yan yüzey aşınmasının uzunluğu ve genişliği ve/veya kraterin oluştuğu yüzey alanı dikkate alınarak aşınma değerleri hesaplanmıştır.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

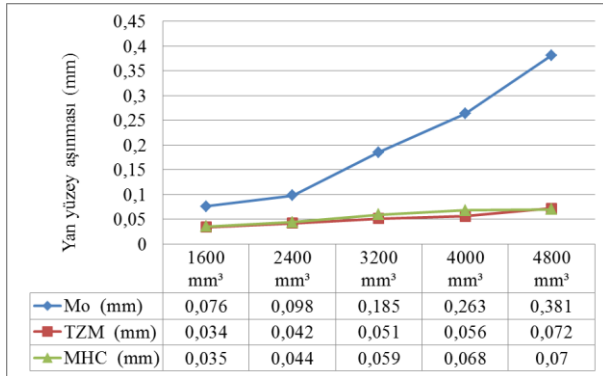
3.1. Metalografik Analiz (Metallographic Analysis)

Şekil 2’de verilen mikroyapı görüntüleri incelendiğinde; saf molibden mikroyapısının düzgün şekilli tane tutucuların özellikleri ise Çizelge 4’te verilmektedir. Kesici takımlar Ø12 mm çapında tek ağızlı takım tutuculara mekanik olarak bağlanmıştır.



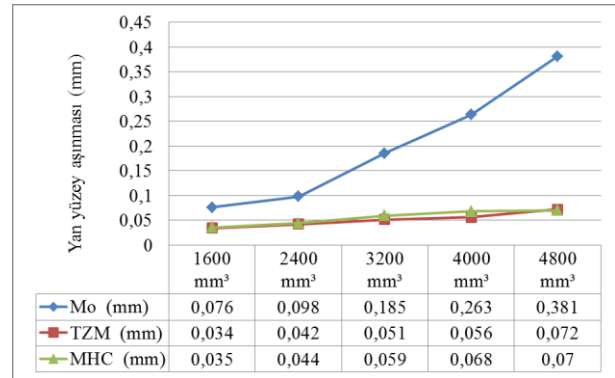
Şekil 2. Deney malzemelerinin mikroyapıları a) saf molibden, b) TZM ve c) MHC (Microstructures of test materials a) pure molybdenum, b) TZM and c) MHC)

Deneylere yan yüzey aşınması yaklaşık (aşınma bandı) 0,4 mm değerine ulaşıncaya kadar devam edilmiştir. Saf molibden için yan yüzey aşınması giderek artarken TZM ve MHC alaşımlarının işlenmesinde yan yüzey aşınması önemli oranda artmamıştır. Şekil 3'te yan yüzey aşınma miktarları verilmiştir. Deneylere sırasıyla 2400 mm³, 3200 mm³, 4000 mm³ ve 4800 mm³ talaş kaldırılarak devam edilmiş ve her seviyede takım aşınma değerleri ölçülmüştür. Deneylere saf molibden için aşınma bandı ≈0,4 mm seviyesine çıkına kadar devam edilmiştir.



Şekil 3. Yan yüzey aşınma değerleri (Flank wear values)

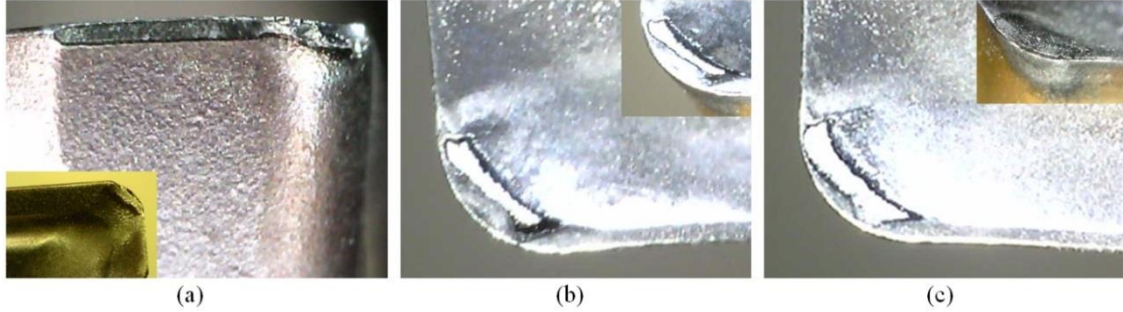
Şekil 4'teki grafikte TZM ve MHC alaşımları için krater aşınması değerleri görülmektedir. Krater aşınması 1600 mm³ talaş hacminde TZM ve MHC için yaklaşık 3 mm² olurken, kaldırılan talaş hacmi arttıkça krater aşınması da artmaya devam etmiştir. Krater aşınması, her talaş hacminde MHC alaşımında, TZM alaşımına nazaran daha yüksektir. 4800 mm³ talaş hacminde TZM alaşımında yaklaşık 6 mm² çıkan krater aşınması, MHC alaşımında ise 8 mm²'nin üzerine çıktığı görülmüştür.



Şekil 4. TZM ve MHC işlenmesinde oluşan krater aşınma değerleri (Crater wear values in TZM and MHC machining)

Şekil 5a'da saf molibdenin 4240 kodlu kesici takımla 150 m/dk kesme hızında ve 0,2 mm/diş ilerleme miktarında 4800 mm³ talaş hacmi sonunda oluşan yan yüzey aşınma miktarı, Şekil 5b'de TZM alaşımının KC522M kodlu kesici takımla 150 m/dk kesme hızında ve 0,15 mm/diş ilerleme miktarında 4800 mm³ talaş

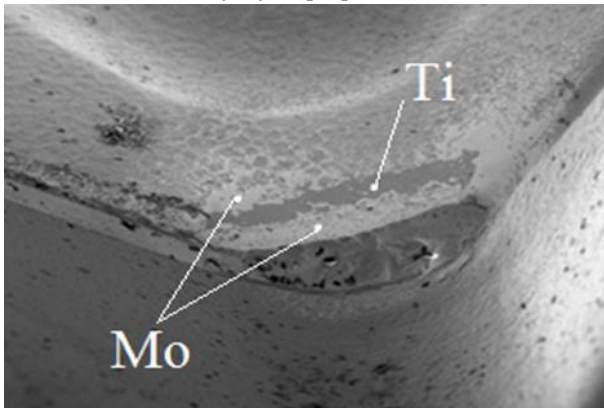
hacmi sonucunda meydana gelen krater aşınması ve Şekil 5c'de ise MHC alaşımının KC522M kodlu kesici takımla 150 m/dk kesme hızında ve 0,10 mm/diş ilerleme miktarında 4800 mm³ talaş hacmi sonucunda meydana gelen krater aşınması görülmektedir.



Şekil 5. Kesici takımlarda meydana gelen aşınmalar a) saf molibden b) TZM ve c) MHC (Wear on cutting tools a) Pure molybdenum b) TZM and c) MHC)

Genellikle büyük olmayan bir krater aşınması takım ömrü üzerinde çok etkili değildir. Krater oluşumu kesici takım talaş açısının etkinliğini artırarak kesme kuvvetlerinde azalmaya da sebep olur. Ancak aşırı krater aşınması kesme kenarını zayıflatarak kırılmalara sebep olur. Krater aşınması takım geometrisini değiştirerek talaş açısının artmasına sebep olmaktadır [28]. TZM ve MHC alaşımlarının işlenmesinde oluşan takım aşınma deneyleri, kesici takımlarda kırılma olmadığından saf molibdende kaldırılan toplam talaş hacmi dikkate alınarak yapılmıştır.

Saf molibdenin 4240 kodlu kesici takımla 150 m/dk kesme hızında 0,2 mm/diş ilerleme miktarında işlenmesi sonucunda kesici takımında meydana gelen yan yüzey aşınmasının SEM görüntüsü Şekil 6'da verilmiştir. Şekil 6'da görüldüğü gibi takımında molibden kalıntıları gözlemlenmiştir. Saf molibdenin işlenmesi sürecinde iş parçası malzemesi kesici takım üzerine yapışma eğilimine girmiştir. Sünek malzemelerin işlenmesinde bu durumla sıklıkla karşılaşılır [29].



Şekil 6. Saf molibdenin işlenmesinde kesici takımında oluşan aşınmanın SEM görüntüsü (×150) (SEM image of cutting tool wear in machining pure molybdenum (×150))

Şekil 7'de TZM alaşımının KC522M kodlu kesici takımla 150 m/dk kesme hızında 0,15 mm/diş ilerleme miktarında işlenmesi sonucu kesici takımında oluşan yan yüzey ve krater aşınmasının SEM görüntüsü verilmiştir. TZM alaşımının işlenmesinde kesici takımında önemsenmeyecek değerlerde yan yüzey aşınması olduğu görülmektedir (Şekil 3). KC522M kodlu kesici takım PVD (AlTi)N kaplamalıdır. Şekil 7'deki EDX analiz sonucunda kraterin kenarlarında kaplama malzemesi olan titanyum görülmektedir. Ayrıca iş parçasının ana elementi olan molibden yoğun olarak kraterin tabanında ve az miktarda ise kesici takımın yüzeyine yapışmış halde görülmektedir.

Krater aşınması iş parçası malzemesi ile kesici takım arasındaki kimyasal reaksiyondan kaynaklanır. Kesme kuvveti ve kesme bölgesindeki ısının artması bu reaksiyonun hızlanmasına neden olmaktadır. Kesme kuvvetleri ve ısı doğru orantılıdır ve kesme hızındaki değişime paralel olarak değişir [30]. Aşınma deneyleri TZM ve MHC alaşımlarında 150 m/dk kesme hızında yapılmıştır ve bu değer literatürde belirtilen molibden ve alaşımlarının frezelenmesinde kullanılan yaklaşık üst limittir. TZM ve MHC alaşımlarında krater aşınmasının sebebi olarak alaşımları oluşturan sert partiküllerin kesici takım kaplama malzemesini kırması ve kesici takım malzemesi ile molibdenin reaksiyona girerek krater aşınmasını oluşturduğu düşünülmektedir. MHC alaşımında TZM alaşımına nazaran daha büyük bir krater aşınmasının olması MHC alaşımını oluşturan hafniyum karbürler olduğu düşünülmektedir [26, 31].

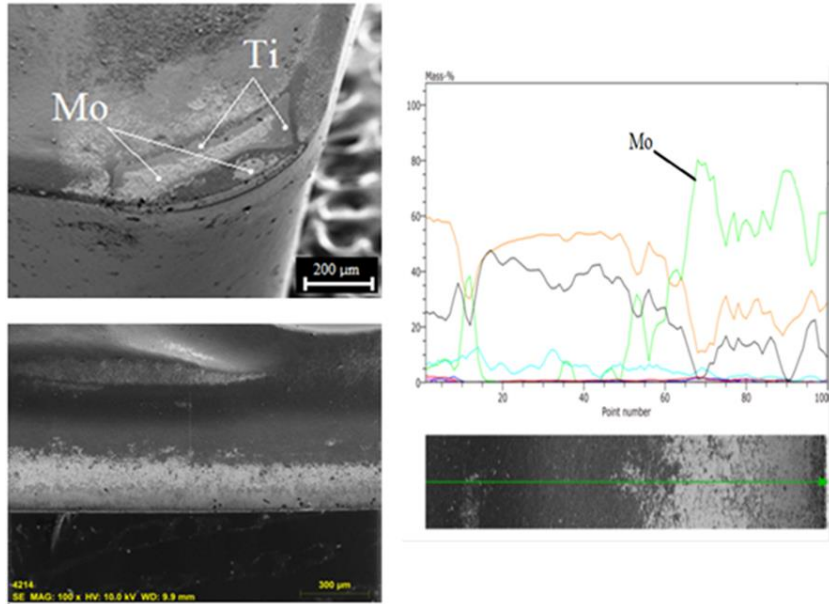
Saf molibden krater aşınması gözlemlenmemiştir. Bu da saf molibdenin diğer alaşımlara nazaran daha yumuşak olması ve alaşım elementi (kaplamaya zarar verebilecek sert yapılar) ihtiva etmemesi olarak değerlendirilebilir [32, 36, 37].

Şekil 8'de MHC alaşımının PVD (AlTi)N kaplamalı KC522M kodlu kesici takımla 150 m/dk kesme hızında

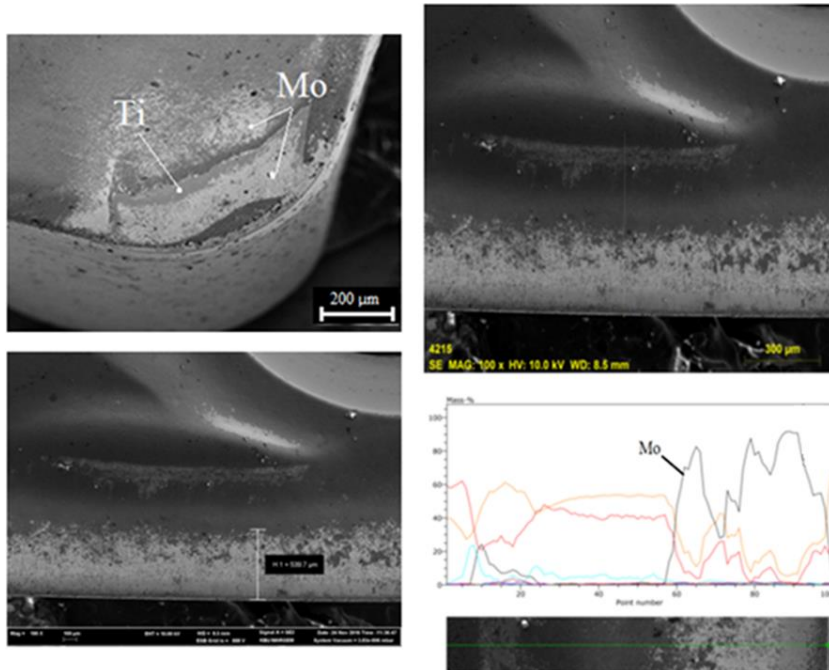
0,10 mm/diş ilerleme miktarında işlenmesi sonucu kesici takımında oluşan yan yüzey ve krater aşınmasının SEM görüntüleri verilmiştir. TZM alaşımında olduğu gibi, kesici takımında önemsenmeyecek düzeyde yan yüzey aşınması meydana gelmiştir (Şekil 3). Kesici takımın SEM görüntüleri ve EDX sonucuna göre iş parçasının ana elementi olan molibden yoğun olarak kraterin tabanında ve az miktarda ise kesici takımın yüzeyine yapışmış halde görülmektedir. Kraterin büyüklüğünü gözönüne aldığımızda deneylere devam edilirse kısa süre sonra kesici ucun kırılacağı ve/veya

aşırı derecede aşınacağı yine SEM görüntülerinden anlaşılmaktadır.

Şekil 8’de MHC alaşımı işlenirken oluşan yapışmanın EDX çizgi analizinde molibden seviyesinin kesici takım üzerinde önemli ölçüde arttığı gözlenmektedir. Ayrıca Şekil 8’de bu aşınmanın bandının büyüklüğü görülmektedir. Bu yapışma talaş derinliğinden yüksek bir değerdedir ($0,5 < 0,5397$ mm) Bunun nedeni de kayma düzlem açısı olarak düşünülmektedir [32 - 37].



Şekil 7. TZM alaşımının işlenmesinde kesici takımında oluşan aşınmanın SEM görüntüsü ve EDX sonuçları (SEM image and EDX results of cutting tool wear in TZM alloy machining)



Şekil 8. MHC alaşımının işlenmesinde kesici takımında oluşan aşınmanın SEM görüntüsü ve EDX sonuçları (SEM image and EDX results of cutting tool wear in MHC alloy machining)

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Üç farklı molibden esaslı malzemenin (ticari saflıktaki molibden, TZM ve MHC) alın frezeleme yöntemi ile işlenmesi sonucu oluşan takım aşınmaları literatürden elde edilen optimum yüzey pürüzlülük değerleri baz alınarak incelenmeye çalışılmıştır. Kesici takım ve kesme parametrelerinin seçimi optimum yüzey pürüzlülük değerlerinin elde edildiği parametrelere göre belirlenmiş ve takım aşınma deneyleri yapılmıştır. Yapılan deneyler ve analizler sonucunda aşağıdaki çıkarımlar elde edilmiştir.

- Kesici takım aşınmaları SEM altında incelendiğinde, aşınma türü olarak saf molibden için yan yüzey aşınması, TZM ve MHC alaşımlarında ise krater aşınması olduğu tespit edilmiştir.
- TZM ve MHC alaşımlarının işlenmesinde oluşan krater aşınması, kesici takım üzerindeki kaplamanın kesintili kesmeden dolayı kırılması ve molibdenin kesici takım malzemesi ile etkileşime girerek olduğu kanaatine varılmıştır. MHC alaşımı işlenirken daha yüksek olan krater aşınmasının en etkin sebebinin hafniyum karbürlerden kaynaklandığı düşünülmektedir.
- Kesici takım üzerinde yapışmanın oranının saf molibdenin işlenmesi esnasında yoğunlaşması, diğer alaşımlara nazaran düşük sertliğe sahip olması ile açıklanmıştır.

5. SİMGELER (SYMBOLS)

EDX	Enerji yayımlı X-Işın analizi
f	İlerleme miktarı (mm/diş)
KT	Kesici takım
MHC	Molibden hafniyum karbon alaşımı
PVD	Fiziksel buhar biriktirme
Ra	Ortalama yüzey pürüzlülük değeri (μm)
SEM	Taramalı elektron mikroskobu
TZM	Titanyum zirkonyum molibden alaşımı
Vc	Kesme hızı (m/dk)

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışma, Karabük Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü tarafından KBÜ-BAP-15/2-DR-002 kodlu proje ile desteklenmiştir. Kuruma desteklerinden ötürü teşekkür ederim.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

Hüseyin GÖKÇE: Deneyleri yapmış ve makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir. / Performed the experiments and wrote the manuscript.

İbrahim ÇİFTÇİ: Sonuçları analiz etmiştir. / Performed the analyse the results.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur. / There is no conflict of interest in this study.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Fan J., Lu M., Cheng H., Tian J. and Huang B., "Effect of alloying elements Ti, Zr on the property and microstructure of molybdenum", *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 27: 78-82, (2009).
- [2] Henckens M.L.C.M., Driessen P.P.J. and Worrell E., "Molybdenum resources: Their depletion and safeguarding for future generations", *Resources, Conservation & Recycling*, 134: 61-69, (2018).
- [3] www.plansee.com/en/materials/molybdenum.htm, "Molybdenum", (2019).
- [4] www.imoa.info/download_files/molyreview/IMOA_Newsletter/IMOANews_07-07.pdf, "Traditional and emerging applications of molybdenum metal and its alloys", (2007).
- [5] Pavelek M. and Donic T., "Simulation study of dynamic heating process of molybdenum for sheet suited for rigid transport components design", *Transportation Research Procedia*, 40: 442-448, (2019).
- [6] www.astm.org/Standards/B387.htm, "Standart specification for molybdenum and molybdenum alloy bar, rod and wire", (2019).
- [7] Park J.B. and Lakes R.S., "*Biomaterials, Planum Pres*", New York and London, 66: 115, (2007).
- [8] Janabi H.N.A., Gökçe H. and Sarıfakıoğlu E., "Seismic analysis of oil storage tanks with different geometries", *Journal of Polytechnic*, *(*) : *, (*). Doi: 10.2339/politeknik.1127303.
- [9] Demellayer R. and Richard J., "High precision electro discharge machining of Molybdenum and Tungsten", *Procedia CIRP*, 6: 89-94, (2013).
- [10] Kuljanic E., Sortino M. and Totis G., "*Machinability of difficult machining materials*", 14th International Research/Expert Conference – Trends in the Development of Machinery and Associated Technology, Mediterranean Cruise, I1-I14, (2010).
- [11] Zlatin N., Field M. and Gould J., "*Machining of refractory materials*", Armed Services Technical Information Agency, ASD Interim Report Unclassified, Virginia, 7-532a(IX), (1963).
- [12] Sortino M., Totis G. and Prospero F., "Dry turning of sintered molybdenum", *Journal of Materials Processing Technology*, 213: 1179-1190, (2013).
- [13] www.edfagan.com/molybdenum-and-molybdenum-alloys-machining-guide.php, "General Guide to

- Machining Molybdenum and molybdenum Alloy”, (2017).
- [14] Chandler H.E., “*Machining of specific metals and alloys*”, ASM Handbook 16 Machining, ASM International, U.S.A., 858-870, (1990).
- [15] Muralova K., Benes L., Zahradnicek R., Bednar J., Otoupalik J., Fiserova Z. and Fiala Z., “Micro-milling machinability of pure molybdenum”, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 102: 4153-4165, (2019).
- [16] www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=ef57c33963404798ad0301a05692312a&ckck=1, “Molybdenum, Mo, Annealed”, (2019).
- [17] www.imoa.info/download_files/molybdenum/Applications_Mo_Metal.pdf, “Applications of molybdenum metal and its alloys”, (2013).
- [18] Çiftçi İ. and Gökçe H., “Optimisation of cutting tool and cutting parameters in machining of molybdenum alloys through the Taguchi Method”, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 34 (1): 201-213, (2019).
- [19] Braun J., Kaserer L., Stajkovic J., Leitz K.-H., Tabernig B., Singer P., Leibenguth P., Gspan C., Kestler H. and Leichtfried G., “Molybdenum and tungsten manufactured by selective laser melting: Analysis of defect structure and solidification mechanisms”, *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials*, 84: 104999, (2019).
- [20] Wang X., Tang H., Shao M., Jin H. and Liu H., “Laser impact welding: Investigation on microstructure and mechanical properties of molybdenum-copper welding joint”, *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials*, 80: 1-10, (2019).
- [21] Allen P. and Chen X., “Process simulation of micro electro-discharge machining on molybdenum”, *Journal of Materials Processing Technology*, 186: 346-355, (2007).
- [22] Fan J., Lu M., Cheng H., Tian J. and Huang, B., “Effect of alloying elements Ti, Zr on the property and microstructure of molybdenum”, *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 27: 78-82, (2009).
- [23] Warren J., “The 700°C tensile behavior of Mo-0.5Ti-0.08Zr-0.025C (TZM) extruded bar measured transverse and parallel to the billet extrusion axis”, *International Journal of Refractory Metals & Materials*, 16: 149-157, (1998).
- [24] Stütz M., Buzolin R., Pixner F., Poletti C. and Enzinger N., “Microstructure development of molybdenum during rotary friction welding”, *Materials Characterization*, 151: 506-518, (2019).
- [25] Raffo P.L., “*Thermomechanical processing of molybdenum-hafnium-carbon alloys*”, NASA Technical Note TN D-5645, Washington D.C., (1970).
- [26] Calderon H.A., Kostorz G. and Ullrich G., “Microstructure and plasticity of two molybdenum-based alloys (TZM)”, *Materials Science and Engineering A*, 160 (2): 189-199, (1993).
- [27] Pöhl C., Schatte J. and Leitner H., “Metallographic characterization of the molybdenum based alloy MHC by a color etching technique”, *Materials Characterization*, 77: 63-69, (2013).
- [28] Kalpakjian S. and Schmid S.R., “*Manufacturing Engineering and Technology*”, 6th ed., Pearson Education, (2009).
- [29] Gökçe H., Çiftçi İ. and Demir H., “Cutting parameter optimization in shoulder milling of commercially pure molybdenum”, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 40: 360, (2018).
- [30] Sandvik Koromant, “*Modern metal cutting – A practical handbook*”, English Edition, Sandvik Coromant, Sweden, I-III, (1994).
- [31] Gökçe H., Yavuz M. and Çiftçi İ., “An investigation into the performance of HSS drills when drilling commercially pure molybdenum”, *Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences*, 38(1): 61-70, (2020).
- [32] Akkaş G. and Korkut İ., “Kinematic analysis of tapping machine and simulation with simmechanics”, *Politeknik Dergisi*, 22(2): 431-436, (2019).
- [33] Gökçe H., Çiftçi İ. and Gökçe H., “Frezeleme operasyonlarında kesme kuvvetlerinin deneysel ve sonlu elemanlar analizi ile incelenmesi: Saf molibdenin işlenmesi üzerine bir çalışma”, *Politeknik Dergisi*, 22(4): 947-954, (2019).
- [34] Gökçe H. and Yavuz M., “Ticari saflıktaki molibdene HSS kılavuzlarla vida açma işleminde kesme hızının etkisi”, *Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi (GMBD)*, 5(3): 237-243, (2019).
- [35] Tüzüner S., Metin A.B. and Saraloğlu E.G., “Optimization of processing parameters for minimum residual stress and maximum wear resistance during gas nitration of 4140 steel”, *Journal of Polytechnic*, *(*) : *, (*). Doi: 10.2339/politeknik.993934.
- [36] Gökçe H., “Modelling and Optimization for Thrust Force, Temperature and Burr Height in Drilling of Custom 450”, *Experimental Techniques*, 46: 707-721 (2022).
- [37] Çiftçi İ. and Gökçe H., “Ti6Al4V Titanyum Alaşımının Delinmesinde Delme Yönteminin Aşınmaya Etkisinin İncelenmesi”, *Politeknik Dergisi*, 22(3): 627-631, (2019).