



Titanyum Alaşımlarından Ti-6Al-4V'nın İşlenmesinde Karşılaşılan Zorluklar: Derleme

Yahya Hışman ÇELİK¹, Erol KILIÇKAP²

¹Batman Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Batman

²Dicle Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Diyarbakır

Öz

Titanyum ve alaşımları, mükemmel ısı direnci, korozyon direnci, tokluk, mukavemet, yüksek çalışma sıcaklığı ve düşük ağırlık oranına sahip oldukları için uzay-havacılık, otomotiv, kimya-petrokimya ve biyomedikal gibi çeşitli endüstrilerde yüksek mühendislik alaşımları olarak kullanılmaktadırlar. Ancak bu alaşımlar düşük işlenebilirlik derecelerine sahiptirler. Titanyum ve alaşımlarının işlenmesinde yüzey bütünlüğü ve kesici takım aşınması gibi problemlerle karşılaşmaktadır. Bu çalışmada, titanyum ve alaşımlarının delinmesinde, frezelenmesinde ve tornalanmasında kesici takım malzemeleri, aşınma mekanizmaları, kesme kuvvetleri, yüzey pürüzlülükleri gibi konular gözden geçirilmiştir. Ayrıca, bu alaşımların işlenmesinde karşılaşılan zorluklar değerlendirilmiş olup yapılmış literatür çalışmaları ayrıntılı olarak ele alınmıştır.

Makale Bilgisi

Başvuru: 08/08/2017
 Düzeltilme: 05/01/2018
 Kabul: 18/01/2018

Anahtar Kelimeler

Titanyum
 İşlenebilirlik
 Aşınma
 Pürüzlülük
 Kesme Kuvveti

Keywords

Titanium
 Machinability
 Wear
 Roughness
 Cutting Force

Challenges Encountered in the Machining of Ti-6Al-4V from Titanium Alloys: Review

Abstract

Titanium and its alloys are used as high engineering alloys in various industries such as aerospace, automotive, chemical-petrochemical and biomedical because they have excellent heat resistance, corrosion resistance, toughness, strength, high working temperature and low weight ratio. However, these alloys have low machinability. In the machining of titanium and its alloys, problems such as surface integrity and cutting tool wear are encountered. In this study, subjects such as cutting tools, wear mechanisms, cutting forces, surface roughness are examined in drilling, milling and turning of titanium and its alloys. In addition, the difficulties encountered in the machining of these alloys have been evaluated and the literature studies have been discussed as detail.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Titanyum yer kabuğunun %6'sını oluşturmaktadır. Ancak üretim işleminin zorluğu ve teknolojik yetersizlikten dolayı 1940'lı yıllara kadar endüstriyel bir malzeme olarak kullanılmamıştır. 1940'lı yıllarda Wilhelm Kroll'un geliştirdiği ve Kroll adını taşıyan yöntemle üretimi başlamıştır. Kroll yönteminin ticari yönden uygulanabilirliği ortaya çıkınca 1947 yılında ABD silâhlı kuvvetleri titanyumla ilgilenmeye başlamıştır. Bu alaşımın ilk uygulamaya yönelik üretimi, 1952'de DC-7 tipi uçağın motorundaki yanma odası ve uçağın kanatlarındaki motor bağlantı yeri için gerçekleştirilmiştir [1,2]. Ancak titanyum alaşımlarının düşük ağırlığı, iyi korozyon direnci, düşük termal iletkenliği, yüksek sıcaklık dayanımı, yüksek mukavemet, düşük elastik modülü, uzun servis ömrü ve kompozit yapılarla rekabet edici özelliklere sahip olması bu alaşımların uçak, uzay, denizcilik, otomotiv, kimya, petrokimya, biyomedikal ve spor ekipmanları endüstrisi ve mühendisliği gibi pek çok alanda kullanımını arttırmıştır [3-7].

Titanyum ve alaşımlarının mükemmel özellikleri bir arada barındırması, bu alaşımların sınıflandırılmasında önemli bir faktördür. Titanyum ve alaşımları; saf titanyum, alfa titanyum alaşımları,

alfa-beta titanyum alaşımları ve beta titanyum alaşımları olarak sınıflandırılmaktadırlar. Saf titanyum 4,51 gr/cm³'lük yoğunluk ile alüminyum ile elik arasında bir yoğunluğa, 1668 °C'lik erime sıcaklığı ile demirden daha yüksek bir ergime noktasına sahip olan nispeten hafif metal gurubundandır. Saf titanyum mükemmel korozyon direncine sahip olması nedeniyle tercih edilmekte ve özellikle yüksek dayanım gerektirmeyen yerlerde kullanılmaktadır. Alfa titanyum alaşımları mükemmel korozyon direncinin yanı sıra kaynak kabiliyetleri de yüksek olan titanyum alaşımlarındandır. Alüminyum, kalay ve zirkonyum içerir. Daha çok yüksek sıcaklık ya da çok soğuk ortamlarda tercih edilmektedir. Ti-5Al-2.5Sn bu alaşım sınıfından biridir. Alfa-beta titanyum alaşımları genel yapısal alaşımlardır. Bu alaşımlar, bileşimlerinde alfa ve bata fazlarının kararlılığını artıran bir ya da daha fazla kararlaştırıcı alaşım elementlerini içerirler. Tavlama sonrasında da yüksek süneklik, homojenlik ve yüksek dayanım sağlanmaktadır. En yaygın kullanılan alfa-beta alaşımı Ti-6Al-4V'dir. Beta alaşımları ise yüksek mukavemet değerlerine sahiptirler. Çünkü büyük oranda vanadyum ve molibden içerirler [8-10]. Titanyum üretiminin yaklaşık %30'unu alaşımsız türler, yaklaşık %45'ini alfa-beta alaşımı olan Ti-6Al-4V ve geri kalan yaklaşık %25'ini ise diğer alaşımlar oluşurmaktadır [11].

Titanyum ve alaşımlarının işlenmesinde zorluklarla karşılaşılmaktadır. Titanyum alaşımlarının düşük termal iletkenliğe ve yüksek mukavemete sahip olması kesici takım ve iş parçası çifti arasında yüksek sıcaklıkların oluşmasını sağlar, talaş oluşumunu sağlayan plastik deformasyonu zorlaştırır, talaşın takıma yapışmasını kolaylaştırır [12, 13]. Bu alaşımlar yüksek sıcaklıklarda kesici takım ile kimyasal tepkimeye girerler ve nispeten kesici takım/talaş arasındaki etkileşim alanının çok küçük olmasından dolayı takım ucundaki sıcaklıkların oldukça yüksek bir değere ulaşmasına (yaklaşık 1100 °C) neden olur [14, 15]. Sonuç olarak kesici takım hızlı aşınır, talaşlı işleme esnasında titreşimler oluşur ve işlenen yüzeyin kalitesi kötüleşir.

Titanyum ve alaşımlarının talaşlı olarak işlenmesinde delme, frezeleme ve tornalama üzerine çok sayıda bilimsel çalışmanın yapıldığı gözlemlenmiştir. Son zamanlarda yapılan alışmalar Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. *Titanyum ve alaşımlarının işlenebilirliği ile ilgili son alışmalar (Recent works on the machinability of titanium and its alloys)*

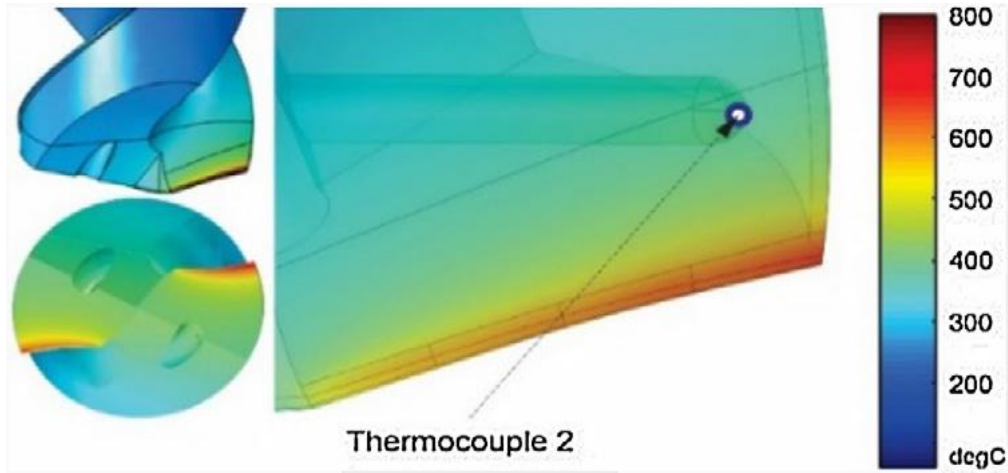
	Makalenin içeriği	Yılı	Ref.
1.	Kuru ve ıslak koşullar altında titanyum alüminid'in delinmesinin incelenmesi	2016	16
2.	Titanyum alaşımlarının delinmesinde işleme parametrelerinin optimizasyonu	2016	17
3.	Ti-6Al-4V alaşımının delinmesinde performans özelliklerine ilişkin inceleme	2017	18
4.	Titanyum alüminid'in yüksek verimli kuru delinmesininin araştırılması	2017	19
5.	Ti-6Al-4V delinmesinde termal analiz	2017	20
6.	Titanyum 6246 alaşımının delinmesinde PVD TiAlN kaplı karbürün performansı	2017	21
7.	Ti-6Al-4V Alaşımının 3D Sonlu Elemanlar Analizi ile delinmesinin incelenmesi	2015	22
8.	Ti-6Al-4V alaşımının kuru helisel frezelemede takım aşınmasının ve delik kalitesinin araştırması	2014	23
9.	Ti-6Al-4V titanyum alaşımının orbital delinmesinde kesme kuvvetlerinin modellenmesi	2016	24
10.	Ti-6Al-4V titanyum alaşımının yüksek hızlı kuru frezelemede yüzey bütünlüğü karakterizasyonu	2015	25
11.	Ti-6Al-4V alaşımının tornalanmasında kuru ve farklı soğutma tekniklerinin teknolojik verimliliğe etkileri	2017	26
12.	Malzeme mikroyapısının gelişimini göz önüne alınarak Ti-6Al-4V alaşımının tornalanmasında kesme kuvvetlerinin modellenmesi	2017	27
13.	Çeşitli Ti-6Al-4V alaşımlarının tornalanmasında takım aşınması üzerine mikroyapısal etkinin analizi	2017	28
14.	Düşük ilerleme oranlarında Ti-6Al-4V alaşımının sürdürülebilir bir şekilde tornalanması: Yüzey kalitesinin değerlendirilmesi	2017	29
15.	Titanyum alaşımlarının tornalanmasında minimum nano yağlamanın etkisinin deneysel olarak incelenmesi	2017	30
16.	Ti-6Al-4V alaşımının işlenmesinde TiN ve TiAlN kaplı mikro oyuklu takımın performansının incelenmesi	2017	31
17.	Ti-6Al-4V tornalanan yüzeyine yakın beyaz ve şekillendirilmiş katmanların mikroyapısının araştırılması	2017	32
18.	Kesme kuvvetlerinin ve takım titreşimlerinin etkileri göz önüne alınarak yüzey pürüzlülüğü için YSA tahmin modelinin geliştirilmesi	2017	33

Tablo 1.(devam) *Titanyum ve alaşımlarının işlenebilirliği ile ilgili son alışmalar (Recent works on the machinability of titanium and its alloys)*

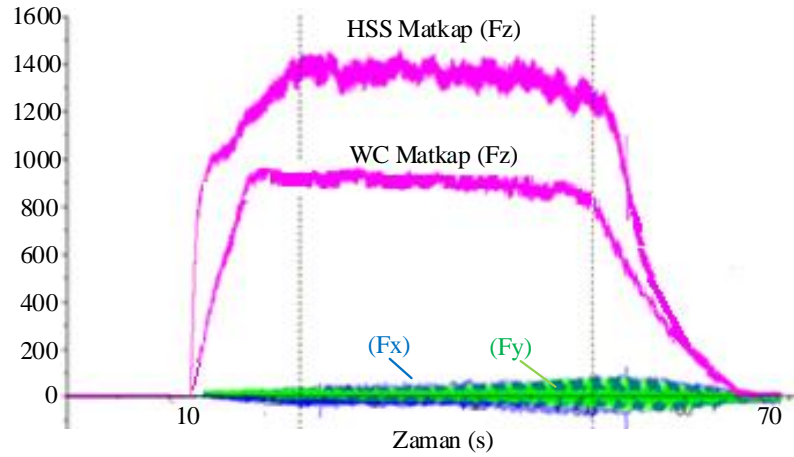
19.	Titanyum alaşımlarının NFMQL destekli tornalanmasında yzey pürzölölüğünün optimizasyonu	2017	34
20.	Tornalama esnasında takım aşınması üzerine kaplama kalınlığı ve yzey pürzölölüğünün etkisi	2017	35
21.	Ti-6Al-4V alaşımının delinmesinde takım ve iş parçası üzerine kesme parametrelerinin etkisi	2016	36
22.	Ti-6Al-4V alaşımının delinmesinde yzey pürzölölüğü, aşınma ve titreşim üzerine etki eden delme parametrelerinin optimizasyonu	2018	37
23.	Ti-6Al-4V'nin mikro frezelenmesinde talaş ve apak oluşumunun sonlu elemanlarla modellenmesi	2017	38
24.	Ti-6Al-4V alaşımının 5 eksenli frezelenmesinde yzey kalitesinin kapsamlı araştırılması	2017	39
25.	Ti-6Al-4V alaşımının frezelenmesinde kesici takım ve işlenen yzey üzerine kesme parametrelerinin etkisi	2016	40
26.	Ti-6Al-4V alaşımının işlenebilirliği ve işleme sıcaklığı üzerine yüksek basınçlı soğutucuların etkisi	2018	41
27.	Ti-6Al-4V alaşımının işlenmesinde talaş oluşumu üzerine takım aşınmasının etkisi	2018	42
28.	Isıl işlem görmüş Ti6Al4V titanyum alaşımlarının mikro frezelenmesinde işleme ıktıları üzerine mikro yapının etkisi	2018	43
29.	Ti-6Al-4V alaşımının CVD ve PVD kaplı WC takımlarla tornalanmasında kesici takım aşınmasının ve yzey pürzölölüğünün araştırılması	2017	44

2. Ti-6Al-4V ALAŞIMININ DELİNMESİ (DRILLING OF Ti-6Al-4V ALLOY)

Titanyum alaşımları gibi hafif malzemeler, yüksek sıcaklıklarda kararlı yapısından dolayı uzay sanayinde motor bileşeni olarak kullanılmaktadırlar. Ancak bu alaşımların makine elemanı olarak kullanılabilmeleri için şekillendirilmeleri gerekmektedir. Bu alaşımlar genellikle talaşlı imalat yntemleri ile nihai form haline getirilmektedirler. Talaşlı imalat yntemlerinden biri delme işlemidir. Ancak bu malzemelerin delinmesinde zorluklarla şılaşılmaktadır. Bu malzemelerin dūřuk termal iletkenliğinden dolayı iř parçası/ takım ara yzeyinde yüksek sıcaklıklar oluşmaktadır (şekil 1). Yüksek mukavemetli olan bu malzemelerin delinmesinde ise yüksek kesme kuvvetleri ile şılaşılmaktadır (şekil 2).

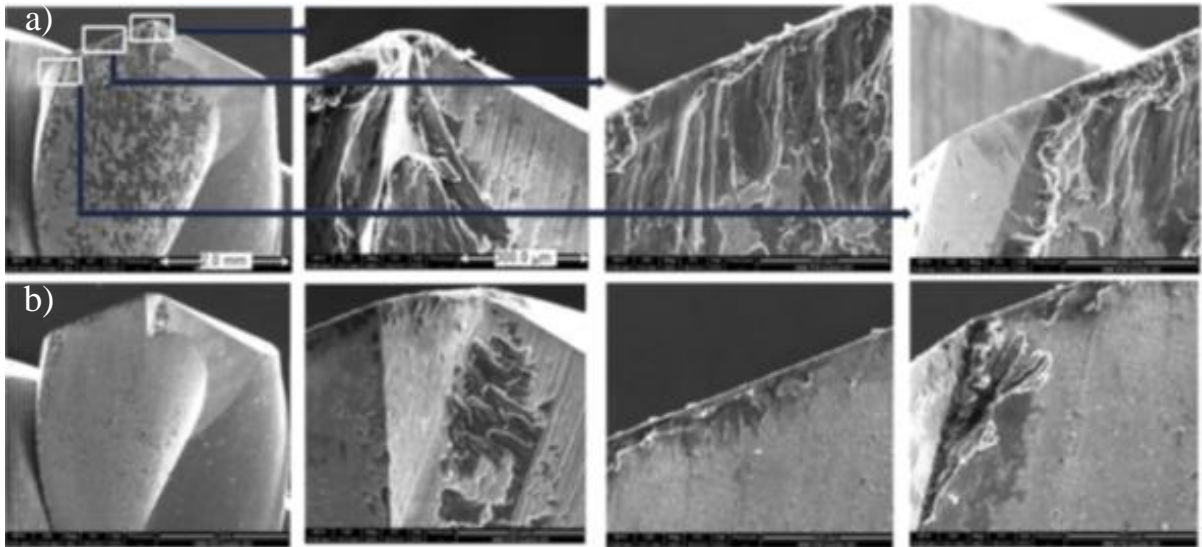


şekil 1. *Ti-6Al-4V'nin delinmesinde sıcaklık oluşumu [20]*
(*Temperature formation at drilling of the Ti-6Al-4V*)



Şekil 2. *Ti-6Al-4V'nin delinmesinde takım malzemesinin kesme kuvveti üzerine etkisi [36]*
(The effect of tool materials on cutting force in the drilling of Ti-6Al-4V)

Li ve Shih [45], titanyum alaşımlarının delinmesinde, farklı kesme hızlarının delme kuvveti, delme momenti ve sıcaklık üzerine etkilerini incelemişlerdir. Delme derinliği arttıca ilerleme kuvvetinin, moment değerinin ve delme bölgesindeki sıcaklığın arttığını gözlemişlerdir. Özellikle, kesme hızının 24,4 m/dak olduğu durumda 12,7 mm delme derinliğinde elde edilen sıcaklığın 480 °C olduğunu ve kesme hızının 73,2 m/dak'ya çıkmasıyla aynı derinlikte elde edilen sıcaklığın 1060 °C'ye ulaştığını belirtmişlerdir. Kıvak ve Őeker [46], Ti-6Al-4V alaşımının kuru ve ıslak kesme Őartları altında kaplamalı ve kaplamasız matkaplarla delinmesinde kesme parametrelerinin kesme kuvvetleri üzerindeki etkileri araştırmışlardır. Kaplama malzemesinin kesme kuvvetleri üzerinde %14'lere varan dūřuřler sağladığını ve ilerlemenin kesme kuvvetlerinin değişimi üzerinde kesme hızından daha etkili olduğu görmüşlerdir. Rahim ve Sasahara [47], Ti-6Al-4V alaşımını yüksek kesme hızlarında delerek değişik soğutma tiplerinin ve farklı kesme parametrelerinin takım aşınmasına, iř parçasında oluşan sıcaklığa ve kesme kuvvetlerine etkisini incelemişlerdir. Pujana ve arkadaşları [48], Ti-6Al-4V alaşımının delinmesinde malzemeye uygulanan ultrasonik titreşimlerin sıcaklık değişimi, talaş oluşumunu ve kesme kuvvetleri üzerine etkilerini incelemişlerdir. Titreřimin artmasıyla delme esnasında daha yüksek sıcaklığın oluştuğunu ve kesme için daha fazla kuvvetin gerektirdiğini görmüşlerdir. Yüksek sıcaklık ve yüksek kesme kuvvetinin etkisi ve kesici takım ile iř parçası arasında kimyasal etkileşiminden dolayı takımda daha hızlı aşınma oluşmakta ve iř parçası takıma yapışarak takımın kısa sūrede kullanılamaz hale gelmesine neden olmaktadır (Őekil 3).

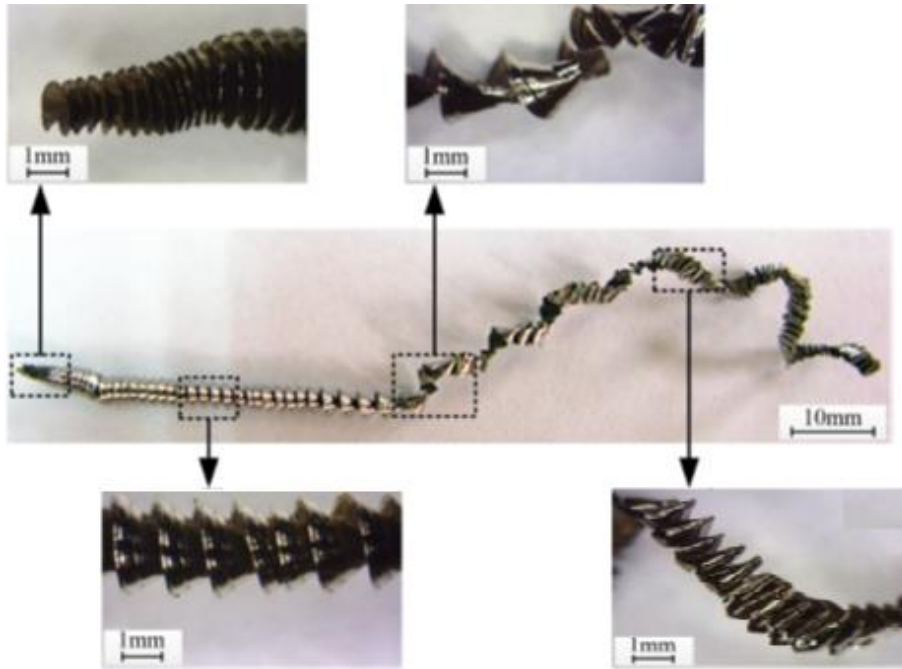


a) Kuru delme, b) Islak delme

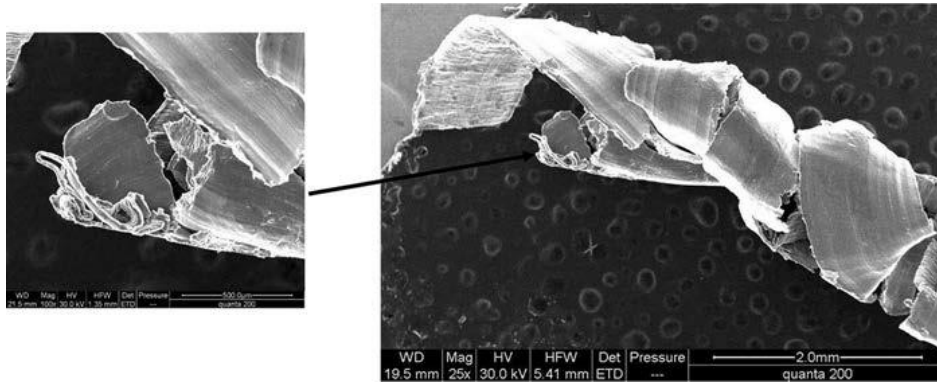
Şekil 3. *Ti-48Al-2Cr-2Nb alaşımının delinmesine ait takım SEM gōrüntüleri [16]*
(Tool SEM images belonging to drilling of Ti-48%Al-2%Cr-2%Nb alloy)

SenthilKumar ve arkadaşları [49], karbon fiber takviyeli plastik/titanyum alaşım tabakalı malzemelerini farklı delme parametrelerinde delerek delme parametrelerinin takım aşınması üzerine etkilerini incelemiştir. Delik sayısı arttıkça aşınma miktarının arttığını, ayrıca 130° uç açısına sahip matkaplarda 118° uç açısına sahip matkaplara göre talaşın daha iyi tahliye edildiğini ve daha az aşınmanın olduğunu gözlemlemiştir. Wong ve arkadaşları [6], Ti-6Al-4V alaşımının delinmesinde takım aşınması ve takım ömrü üzerine delme metodlarının ve matkap uç açısı geometrisinin etkisini incelemiştir. Tüm kesme hızlarında gagalı delme yönteminin doğrudan delme yönteminden daha iyi sonuçlar elde ettiğini, kesme hızı arttıkça takım ömrünün azaldığını ve kesme zamanının artması ile takımın yan aşınmanın arttığını belirtmişlerdir. Takım aşınmasındaki artış malzemedeki gerilmelerin artmasına neden olmaktadır. Guu ve arkadaşları [50], Titanyum ve alaşımlarının delinmesinde oluşan gerilmeleri sonlu elemanlar yöntemini kullanarak analiz etmişlerdir. Isbilir ve Ghassemieh [51], Ti-6Al-4V malzemenin 3D Lagrange sonlu elemanlar modelini kullanarak delinmesinde malzemeye gelen gerilmeleri analiz ederek ilerleme kuvvetinin artmasıyla malzeme üzerinde gerilmelerin ve çapak yüksekliğinin arttığını belirtmişlerdir.

Yüksek sıcaklık, aşınmış takım ve artan titreşimlerin sonucu malzeme üzerinde yüksek plastik deformasyonlar başlar ve talaşın düzensiz olarak oluşmasına neden olur (Şekil 4, Şekil 5). Ayrıca bu olumsuzluklar, işlenen yüzeyin kalitesinin kötü olmasına ve delik çıkışında çapak oluşumuna neden olmaktadır.



Şekil 4. Ti-6Al-4V'nin delinmesinde oluşan talaş görüntüsü [18]
(Chip images formed in the drilling of Ti-6Al-4V)

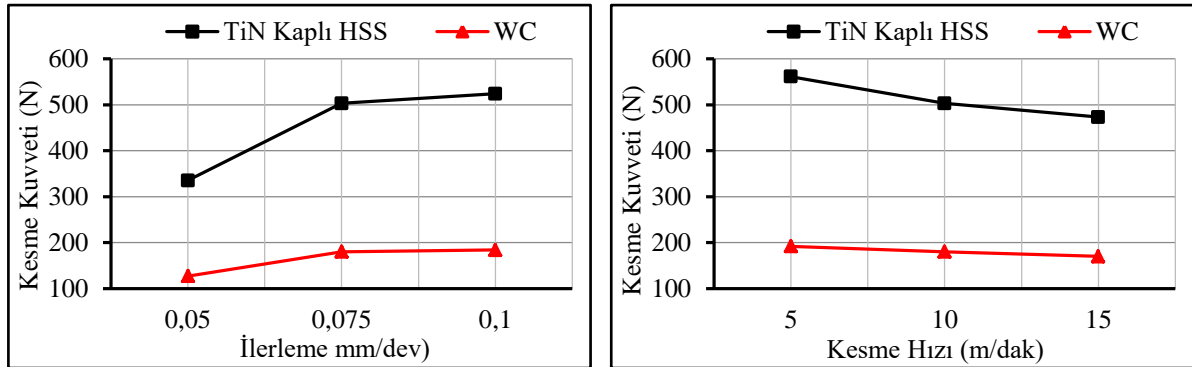


Şekil 5. Titanyum alüminidin delinmesinde oluşan talaş SEM görüntüsü [19]
(Chip SEM images formed in drilling of titanium alumina)

Cantero ve arkadaşları [52], Ti-6Al-4V alaşımının kuru delinmesinde iş parçasının yzey bütünlüğü, işlenen deliğın kalitesi ve takım aşınmasının oluşunu üzerine delme zamanının etkisini incelemişlerdir. Kesme zamanı arttıkça apak yüksekliğinin ve yzey pürüzlülüğünün arttığını, yzey pürüzlülüğü ve apak oluşumunda takım aşınmasının etkili olduğunu gözlemlemişlerdir. Shyha ve arkadaşları [53], Titanyum/CFRP/Alüminyum tabakalı malzemenin farklı kesme parametrelerinde delinmesinde, delik geometrisi, yzey pürüzlülüğünü, talaş oluşumunu ve apak yüksekliğini incelemişlerdir. Feldshtein [54], ostenitik X5CrNi18-10 eliğinin ve Ti-6Al-4V alaşımının delinmesinde apak oluşunu problemlerini incelemişlerdir. Titanyum alaşımının kaplamalı ve kaplamasız takımlarla işlenmesinde; kesme hızı ve ilerlemenin azalmasıyla apak yüksekliğinin arttığını, kesme hızı ve ilerlemenin artmasıyla apak yüksekliğinin azaldığını, kesme hızının azalması ve ilerlemenin artmasıyla apak yüksekliğinin minimum seviyede oluşmasına neden olduğunu gözlemlemiştir. Kaplamasız takımlarla titanyum alaşımının delinmesinde oluşan apağın düzensiz ve uzun olduğunu, kaplamalı takımlarla işlenmesinde ise daha düşük boyutlarda apak oluştuğunu ifade etmiştir. Biermann ve Hartmann [55], apak yüksekliğini minimize etmek için karbondioksiti soğutma sıvısı olarak kullanmışlardır.

3. Ti-6Al-4V ALAŞIMININ REZELENMESİ (MILLING OF Ti-6Al-4V ALLOY)

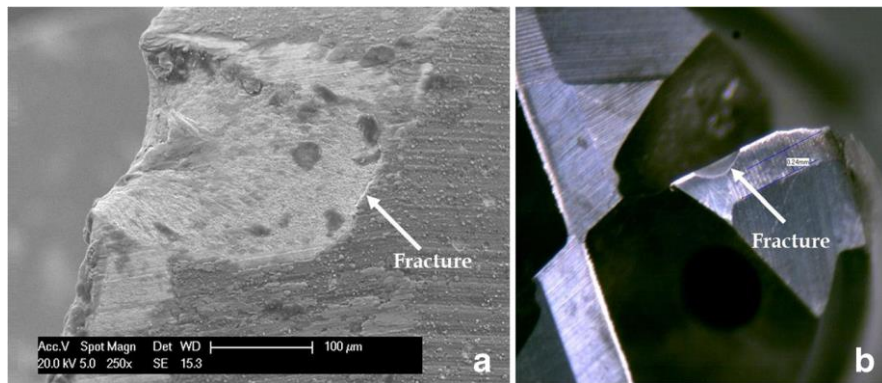
Titanyum ve alaşımlarının nihai Őekle getirilmesi için talaşlı imalat yöntemlerinden olan frezeleme işlemi delme işlemi gibi birden fazla kesici uçla gerçekleştirilmesine rağmen işlem kapalı alanda gerçekleşmediğinden dolayı kesici takımlara gelen kuvvetler (Şekil 6) ve takım aşınması delme işlemindekinden daha azdır. Ancak titanyum alaşımlarının yüksek mukavemet değeri sahip olması ani darbe ve titreşim durumunda bu malzemelerin sert karbür kesici takımlarla işlenmesinde takımın kırılmasına neden olur (Şekil 7).



Kesme hızı=10 m/dak

İlerleme=0.075 mm/dev

Şekil 6. Kesme hızı ve ilerlemeye bağılı kesme kuvveti [40]
(Cutting force depending cutting speed and feed rate)



a) SEM görüntüsü

b) Optik görüntüsü

Şekil 7. Ti-6Al-4V'nin frezelenmesinde takım aşınma görüntüsü [23]
(Tool wear images in the milling of Ti-6Al-4V)

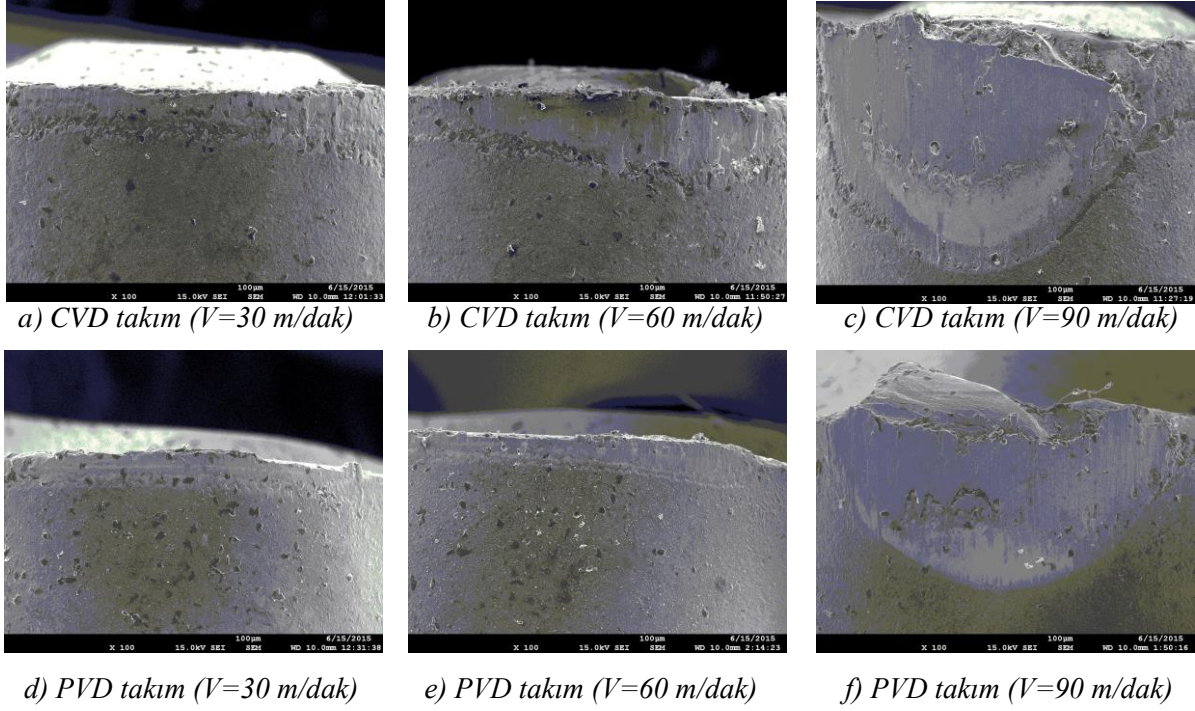
Wang ve arkadaşları [56], kübik bor nitrür (CBN) kesici takım ile Ti-6Al-4V alaşımının frezelenmesinde kesme parametrelerinin kesme kuvveti, takım performansı ve aşınma mekanizması üzerine etkilerini yüksek basınçlı kesme sıvısı kullanarak incelemiştir. Yüksek kesme hızında CBN takım ömrünün iyi olduğunu ve oluşan aşınmanın talaşın iş parçasına yapışmasından meydana geldiğini gözlemlemiştir. İlerlemenin azalmasıyla takım aşınmasının azaldığını ve kesme süresinin arttığını tespit etmiştir. Nouari ve Makich [3], Ti-6Al-4V ve Ti-555 alaşımlarının farklı kesme parametrelerinde işlenmesinde kesme parametrelerinin sıcaklık oluşumu, takım aşınması ve iş parçası mikroyapısı üzerine etkilerini deneysel olarak incelemiştir. Kesme hızı arttıkça sıcaklığın arttığını gözlemlemiştir. Ayrıca kesme hızı arttıkça kesme kuvvetlerinin ve aşınma davranışlarının Ti-6Al-4V ve Ti-555 alaşımları için farklı davranışlar gösterdiğini bildirmiştir. Zareena ve Veldhuis [57], saf titanyum (Cp-Ti) ve Ti-6Al-4V alaşımlarını farklı burun uç yarıçapına (0.3, 0.5 ve 1.5mm) sahip kaplamalı ve kaplamasız konik ve silindirik kristal elmas takımlar kullanarak işlemiştir. Kaplamalı kristal elmasın takım ve iş parçası arasındaki sürtünme katsayısını düşürdüğünü, takım ömrünün uzamasına ve işlenen yüzey kalitesinin iyileşmesine katkı sağladığını belirtmiştir. Thepsonthi ve Özel [58], Ti-6Al-4V alaşımını kübik bor nitrür (CBN) kaplı tungsten karbür takım ve kaplamasız tungsten karbür takım ile frezelenmesinde kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü, takım aşınması ve çapak oluşumu üzerine etkilerini deneysel olarak incelemiştir. CBN kaplı takımlardaki kesme kuvvetlerini kaplamasız takımlara göre daha yüksek elde etmelerine rağmen, CBN kaplı takımlarda daha düşük kesme sıcaklıkları elde etmiştir. Ayrıca CBN takımlardan elde edilen aşınmanın daha düşük olduğunu, takımlarda oluşan ısının ve aşınmanın kesme hızının ve diş başına ilerlemenin artmasıyla arttığını, kesme kuvveti, yüzey pürüzlülüğü ve çapak oluşumunu etkileyen en önemli parametrenin diş başına ilerleme olduğunu gözlemlemiştir. López de lacalle ve arkadaşları [59], Ti-6Al-4V ve Inconel 718 alaşımını, TiC, TiAlN, TiN ve TiCN kaplı takım ve K10 kaplamasız takım kullanarak farklı kesme parametrelerinde frezelemiştir. İlerleme arttıkça yanal aşınmanın arttığını, Inconel 718 alaşımına göre Ti-6Al-4V alaşımından daha yüksek kesme uzunluğu elde edildiğini, ilerleme ve kesme hızı arttıkça kesme uzunluğunun azaldığını ve kesme uzunluğu arttıkça yüzey pürüzlülüğünün azaldığını gözlemlemiştir. Benzer şekilde Bach ve arkadaşları da [60] titanyum ve alaşımlarını değişik kesme parametrelerinde işleyerek kesme parametrelerinin yanal aşınma oluşumu üzerine etkilerini incelemiştir. Ünal ve Karaca [61], Ti-6Al-4V alaşımını farklı kesme parametrelerinde frezelenabilirliğini araştırmışlardır. Kesme hızı ve ilerlemenin artmasıyla yüzey pürüzlülüğünün arttığı tespit edilmiştir. Genel olarak kesme parametrelerine bağlı olarak elde edilen talaşın sürekli sıvanmalı ve testere diş kesitli olduğunu gözlemlemiştir.

4. Ti-6Al-4V ALAŞIMININ TORNALANMASI (TURNING OF Ti-6Al-4V ALLOY)

Titanyum alaşımlarının tornalanarak şekillendirilmesinde tek uçlu kesici takımlar kullanılmaktadır. Titanyum alaşımlarının tornalanarak şekillendirilmesi prensip olarak delme ve frezeleme işlemlerine benzerdir. Bu malzemelerin tornalanmasında yüksek kesme kuvvetleri ve sıcaklık oluşmaktadır. Bu nedenle kesici takım hızı yüksek aşınma meydana gelmektedir (Şekil 8). Özellikle bu alaşımların tornalanmasında kesici takım cinsini bağlı olarak kesme parametrelerinin uygun bir değerde seçilmesi gerekmektedir.

Ramesh ve arkadaşları [7], CVD (TiN, TiCN, Al₂O₃) kaplı sert karburlu kesici takımlarla G5 (Grade 5) titanyum alaşımlarının farklı kesme parametrelerinde tornalanmasında kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne etkisini araştırmışlardır. İlerlemenin yüzey pürüzlülüğüne etki eden en önemli parametre olduğunu, ilerlemenin ve kesme derinliğinin artmasıyla yüzey pürüzlülüğünün önemli ölçüde arttığını, kesme hızının artmasıyla yüzey pürüzlülüğünün azaldığını tespit etmiştir. Armendia ve arkadaşları [62], α+β titanyum alaşımlarından olan Ti-6Al-4V, Ti-5Al-4V-0.6Mo-0.4Fe (Ti54M) ve Ti-6246 alaşımlarını CNMG 120408-23 H13A kaplamasız sert karbür uçlarını kullanarak farklı ilerleme ve sabit talaş derinliğinde 15 dakika kesme zamanı için tornalamışlardır. Bu parametrelerin kesme kuvvetlerine etkisini inceleyerek maksimum kesme hızını tespit etmeye çalışmışlardır. Her üç alaşım için kesme zamanı arttıkça takım aşınmasının, ilerleme arttıkça kesme kuvvetlerinin arttığını gözlemlemiştir. Ti-6246 alaşımının diğer iki titanyum alaşımından daha yüksek mekanik özelliklere sahip olduğunu vurgulayarak bu alaşımın tornalanmasında yüksek ısıl davranışlarının meydana geldiğini ve bunun da Ti-6246 alaşımının tornalanmasında en yüksek takım aşınmasına ve kesme kuvvetlerine maruz kalmasına

neden olduğunu belirtmişlerdir. Ti-5Al-4V-0.6Mo-0.4Fe alaşımının Ti-6Al-4V alaşımına benzer mekanik özelliklere sahip olduğunu ancak en dűřuk aşınmanın Ti-5Al-4V-0.6Mo-0.4Fe alaşımında meydana geldiğini grműřlerdir. Maksimum kesme hızlarının, Ti-6246 alaşımı için 60 m/dak, Ti-6Al-4V alaşımı için 80 m/dak ve Ti-5Al-4V-0.6Mo-0.4Fe alaşımı için 90 m/dak olduğu sonucuna varmışlardır.



řekil 8. *Titanyum alařımının tormalanmasında kaplama tipi ve kesme hızına bađlı ařınma grűntűleri [44] (Wear images depending the type of coating and cutting speed in the turning of the titanium alloy)*

Muthukrishnan ve Davim [63], Ti-6Al-4V alařımını DNM6 120408 ve TTI 15 (%80 alűminyum oksit ve %20 titanyum karpit içeren) seramik kesici takımlarla kesme sıvısı kullanarak ve kullanmadan tormalama deneylerini yapmıřlardır. Kesme parametrelerine bađlı olarak yűzey pűrűzlűlűđűnű ve takım ařınmalarını incelemiřlerdir. Kesme sıvısı kullanılan deneylerden, kesme sıvısı kullanılmayan deneylere göre çok daha iyi yűzeyler elde etmiřlerdir. Sođutma suyunun takım mrűnű yaklařık olarak %30 arttırdıđını, takım ařınmasında difűzyon ařınma tűrűnűn daha etkili olduđunu, kesme hızı arttıđı yzey pűrűzlűlűk deđerinin azaldıđını ve ilerleme arttıđı yzey pűrűzlűlűk deđerinin arttıđını gözlemiřlerdir. Ramesh ve arkadařları [64], Ti-6Al-4V alařımlarının kesme sıvısı kullanılmadan tormalanmasında kesme hızı, ilerleme ve kesme derinliđi gibi kesme parametrelerinin takım ařınması, yűzey pűrűzlűlűđű ve kesme kuvvetlerini űzerine etkilerini deneysel olarak incelemiřlerdir. Kesme hızının artmasıyla takım ařınmanın arttıđını, yűzey pűrűzlűlűđűnűn azaldıđını, ilerleme arttıđı hem takım ařınmanın hem de yűzey pűrűzlűlűđűnűn arttıđını, kesme hızı ve ilerleme arttıđı kesme basıncının azaldıđını, iřleme zamanı arttıđı takım ařınmanın arttıđını gözlemiřlerdir. Andriya [65], TiAlN kaplı kesici takımlar kullanarak Ti-6Al-4V alařımlarının tormalanmasında farklı kesme hızları, ilerleme ve kesme derinliklerinin yűzey pűrűzlűlűđű ve kesme kuvvetleri űzerine etkilerini arařtırmıřlardır. İlerleme ve kesme derinliđi arttıđı kesme kuvvetlerinin ve yűzey pűrűzlűlűk deđerlerinin arttıđını gözlemiřtir. Zhang ve arkadařları [66], TC4 titanyum alařımının ultrasonik titreřimli tormalanmasında elmas takım ařınmasının minimize edilmesine yűnelik deneysel çalıřma yapmıřlardır. Ultrasonik titreřimler, TC4 titanyum alařımının tormalanmasında kesici takım ařınmasının azalmasına neden olduđunu, ilerleme, dönme devri ve kesme derinliđi gibi kesme parametrelerinin artması takım ařınmasının artmasına neden olduđunu gözlemiřlerdir. Kesici takım ařınmalarının genellikle yűksek kesme kuvvetleri ve kesme sıcaklıkları ile elde edildiđine deđinmiřlerdir.

5. TARTIŞMA (DISCUSSION)

Talaş, kesme bölgesinde kesici takım hareketlerinin iş parçasına basma gerilmesi uygulaması ve bu gerilmenin iş parçası malzemesinin akma dayanımını aşmasıyla şekillenir. Şekillendirme esnasında deformasyon enerjileri termal enerjiye dönüşür. Titanyumun düşük termal özelliklerinden dolayı iş parçası ve kesici takım arasında aşırı sıcaklık artışı oluşur. Sıcaklığın etkisiyle malzemede yerel olarak yumuşamalar meydana gelir ve sıcaklık malzeme yüzeyinde iyi iletilmediği için aynı düzlemde malzemenin dayanımı devam eder ve tırtıklı talaş oluşur. Talaş oluşumu üzerinde kesme parametrelerinin etkisi, kesme sıcaklığının etkisi ile anlaşılabilir. Düşük kesme hızlarında termal ısınma sürtünmenin düşük olmasından dolayı düşüktür. Kesme hızının artması iş parçası ve kesici takım arasında sıcaklığın artmasına neden olur. İlerlemenin artması ise kesme kuvvetini ve takım aşınmasını artırır.

Titanyum alaşımları üzerine yapılan çalışmalar incelendiğinde titanyum ve alaşımlarının işlenmesi kesici takım cinsinin, ilerlemenin, kesme hızının, soğutma sıvısı cinsinin ve yönteminin oldukça önemli olduğu görülmüştür. Özellikle kesici takım malzemesi olarak; titanyum ve alaşımları ile kimyasal tepkimeye girme eğilimi az, yüksek sıcaklıkta yüksek sertliğe sahip, talaş oluşumu sırasında iyi bir talaşlanma direncine sahip, iyi yorulma ve basma direnci gösteren, yüksek termal iletkenliğe ve düşük sürtünme katsayısına sahip olan takımlar seçilmelidir. Bu alaşımların işlenmesinde düşük kesme kuvvetlerinin ve gerilmelerin oluşması için en önemli parametre ilerlemedir. Kesme kuvvetlerinin ve gerilmelerin düşük olması için ilerlemenin düşük seçilmesi gerekmektedir. Sıcaklık oluşumu ve takım aşınmasına etki eden en önemli parametre ise kesme hızıdır. Kesme hızının yüksek olması hem sıcaklığı hem de takım aşınmasını artırır. Hem soğutucu hem de yağlayıcı özelliğinden dolayı, soğutma sıvısı kullanımı ise kesme esnasında sıcaklığın düşük olmasına, takım ömrünün artmasına ve işlenen yüzey kalitesinin iyileşmesine imkân tanır.

6. SONUÇ (CONCLUSION)

Ti-6Al-4V alaşımı ile ilgili derleme çalışmasında yapılan araştırmalar incelendiğinde, Ti-6Al-4V alaşımının zor işlenen alaşımlar arasında yer aldığı görülmüştür. Zor işlenebilirlik takımın hızlı aşınmasına ve işlenen yüzey kalitesinin kötü olmasına neden olmaktadır. Bunların üstesinden gelebilmek için aşağıdaki verilen hususlara dikkat edilmelidir.

- Kesme hızı, işleme sıcaklığını arttırdığından kesici takımın katalog değerine göre en düşük değerde seçilmelidir.
- İlerleme yüksek sehim, titreşim ve kesme kuvvetine sebep olduğundan oldukça düşük seçilmelidir.
- Frezeleme ve tornalama işlemlerinde, talaş derinliği düşük seçilmelidir.
- Yüksek aşına direncine ve kimyasal kararlılığa sahip kesici takımlar kullanılmalıdır.
- Yağlama özelliği olan basınçlı soğutma sıvıları tercih edilmelidir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Y. Çakar, Toz enjeksiyon kalıplama ile üretilmiş Ti-6Al-4V parçalarda işlem, yapı ve özellik ilişkileri, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2006.
- [2] C. İçdem, Saf titanyum ve Ti-6Al-4V, Ti-6Al-7Nb alaşımlarının akışkan yatak ortamında termal oksidasyonu, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2007.
- [3] M. Nouari, H. Makich, Experimental investigation on the effect of the material microstructure on tool wear when machining hard titanium alloys: Ti-6Al-4V and Ti-555, International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 41 (2013), 259-269.

- [4] K.H. Park, A. Beal, D. Kim, P. Know, J. Lantrip, Tool wear in drilling of composite/titanium stacks using carbide and polycrystalline diamond tools, *Wear*, 271 (2011), 2826-2835.
- [5] A. Farias, G.F. Batalha, E.F. Prados, R. Magnabosco, S. Delijaicov, Tool wear evaluations in friction stir processing of commercial titanium Ti-6Al-4V, *Wear*, 302 (2013), 1327-1333.
- [6] F.R. Wong, S. Sharif, K. Kamdani, E.A. Rahim, The effect of drill point geometry and drilling technique on tool life when drilling titanium alloy, Ti-6Al-4V, *Proceedings of International Conference on Mechanical & Manufacturing Engineering (ICME2008)*, 21-23 May, Johor Bahru, Malaysia, 2008.
- [7] S. Ramesh, L. Karunamoorthy, K. Palanikumar, Surface roughness analysis in machining of titanium alloy, *Materials and Manufacturing Processes*, 23 (2008), 174-181.
- [8] R. Komanduri, W.R. Reed, Evaluation of carbide grades and a new cutting geometry for machining titanium alloys, *Wear*, 92 (1983), 113-123.
- [9] J.R. Myers, H.B. Bomberger, F.H. Froes, Corrosion behavior and use of titanium and its alloys, *Journal of Metals*, 36 (1984), 50-60.
- [10] F.H. Froes, H.B. Bomberger, The beta titanium alloys, *Journal of Metals*, 36 (1985), 55-62.
- [11] *Metals Handbook, Properties and Selection, Stainless Steels, Tool Materials and Special-Purpose Metals*, ASM, Volum 3, 9th edition, 1980.
- [12] T. Minton, S. Ghani, F. Sammler, R. Bateman, P. Füstmann, M. Roeder, Temperature of internally-cooled diamond-coated tools for dry-cutting titanium, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 75 (2013), 27-35.
- [13] A.R. Machado, J. Wallbank, Machining of titanium and its alloys-a review, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B, Journal of Engineering Manufacture*, 204 (1990), 53-60.
- [14] P.D. Harvey, *Engineering properties of steel*, ASM, Metals Park, OH, ISBN: 0871701448, 1982.
- [15] Y. Şahin, *Talas Kaldırma Prensipleri 2*, Nobel Yayın Dağıtım, Ankara, 2001.
- [16] N.T. Mathew, L. Vijayaraghavan, Drilling of titanium aluminide at different aspect ratio under dry and wet conditions, *Journal of Manufacturing Processes*, 24 (2016), 256-269.
- [17] S. Chatterjee, S.S. Mahapatra, K. Abhishek, Simulation and optimization of machining parameters in drilling of titanium alloys, *Simulation Modelling Practice and Theory*, 62 (2016), 31-48.
- [18] Z. Zhu, S. Sui, J. Sun, J., Li, Y. Li, Investigation on performance characteristics in drilling of Ti6Al4V alloy, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, doi: 10.1007/s00170-017-0508-6, 2017.
- [19] N.T. Mathew, L. Vijayaraghavan, High-throughput dry drilling of titanium aluminide, *Materials and Manufacturing Processes*, 32 (2017), 199-208.
- [20] I. Lazoğlu, G. Poulachon, C. Ramirez, M. Akmal, B. Marcon, F. Rossi, J. Outeiro, M. Krebs, Thermal analysis in Ti-6Al-4V drilling, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.cirp.2017.04.020>, 2017.
- [21] M. Darsin, T. Pasang, Z. Chen, Performance of TiAlN PVD Coated Carbide Drill when Drilling Titanium 6246 Alloy, *MATEC Web of Conferences*, doi: 10.1051/mateconf/20171090200, 2017.
- [22] Y. Su, D.D. Chen, L. Gong, 3D Finite Element Analysis of Drilling of Ti-6Al-4V Alloy, *International Conference on Computer Information Systems and Industrial Applications CISIA 2015*, 907-911, 2015.

- [23] H. Li, G. He, X. Qi, G. Wang, C. Lu, L. Gui, Tool wear and hole quality investigation in dry helical milling of Ti-6Al-4V alloy, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 71 (2014), 1511–1523.
- [24] P.A. Rey, J LeDref, Y. Landon, Modelling of cutting forces in orbital drilling of titanium alloy Ti-6Al-4V, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 106 (2016), 75–88.
- [25] H. Safari, S. Sharif, S. Izham, H. Jafari, Surface integrity characterization in high-speed dry end milling of Ti-6Al-4V titanium alloy, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 78 (2015), 651–657.
- [26] M.G. Faga, P.C. Priarone, M. Robiglio, L. Settineri, V. Tebaldo, Technological and Sustainability Implications of Dry, Near-Dry, and Wet Turning of Ti-6Al-4V Alloy, *International Journal of Precision Engineering and manufacturing-Green Technology*, 4 (2017), 129-139.
- [27] Z. Pan, D.S. Shih, A. Tabei, H. Garmestani, S.Y. Liang, Modeling of Ti-6Al-4V machining force considering material microstructure evolution, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, doi: 10.1007/s00170-016-9964-7, 2017.
- [28] D. Nguyen, D. Kang, T. Bieler, K. Park, P. Known, Microstructural impact on flank wear during turning of various Ti-6Al-4V alloys, *Wear*, 384–385 (2017), 72–83.
- [29] D. Carou, E.V. Rubio, B. Agostina, R. Teti, Sustainable turning of the Ti-6Al-4V alloy at low feed rates: surface quality assessment, *Procedia Manufacturing*, 8 (2017), 769-774.
- [30] M.A.M. Ali, A.I. Azmi, A.N.M. Khalil, K.W. Leong, Experimental study on minimal nanolubrication with surfactant in the turning of titanium alloys, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, doi: 10.1007/s00170-017-0133-4, 2017
- [31] D. Arulkirubakaran, V. Senthilkumar, Performance of TiN and TiAlN coated micro-grooved tools during machining of Ti-6Al-4V alloy, *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 62 (2017), 47–57.
- [32] M. Rancic, C. Colin, M. Sennour, J-P. Costes, G. Poulachon, Microstructural Investigations of the White and Deformed Layers Close to the Turned Surface of Ti-6Al-4V, *Metallurgical and Materials Transactions A*, 48A (2017), 389-402.
- [33] Y. Chen, R. Sun, Y. Gao, J. Leopold, A nested-ANN prediction model for surface roughness considering the effects of cutting forces and tool vibrations, *Measurement*, 98 (2017), 25–34.
- [34] M.K. Gupta, P.K. Sood, Surface roughness measurements in NFMQL assisted turning of titanium alloys: An optimization approach, *Friction*, 5 (2017), 155–170.
- [35] M. Bar-Hen, I. Etsion, Experimental study of the effect of coating thickness and substrate roughness on tool wear during turning, *Tribology International*, 110 (2017), 341–347.
- [36] Y.H. Çelik, H. Yildiz, C. Özek, Effect of cutting parameters on workpiece and tool properties during drilling of Ti-6Al-4V, *Materials Testing*, 58 (2016), 519-525.
- [37] M. Balaji, K.V. Rao, N.M. Rao, B.S.N. Murthy, Optimization of drilling parameters for drilling of TI-6Al-4V based on surface roughness, flank wear and drill vibration, *Measurement*, 114 (2018), 332–339.
- [38] T. Özel, A. Olleak, T. Thepsonthi, Micro milling of titanium alloy Ti-6Al-4V: 3-D finite element modeling for prediction of chip flow and burr formation, *Production Engineering*, 11 (2017), 435–444.

- [39] A.M. Khorasani, I. Gibson, M. Goldberg, G. Littlefair, A comprehensive study on surface quality in 5-axis milling of SLM Ti-6Al-4V spherical components, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, DOI 10.1007/s00170-017-1048-9.
- [40] Y.H. Çelik, A. Karabiyik, Effect of cutting parameters on machining surface and cutting tool in milling of Ti-6Al-4V alloy, *Indian Journal of Engineering & Materials Sciences*, 23 (2016), 349-356.
- [41] M. Mia, N.R. Dhar, Effects of duplex jets high-pressure coolant on machining temperature and machinability of Ti-6Al-4V superalloy, *Journal of Materials Processing Technology*, 252 (2018), 688–696.
- [42] M.S. Dargusch, S. Sun, J.W. Kim, T. Li, P. Trimby, J. Cairney, Effect of tool wear evolution on chip formation during dry machining of Ti-6Al-4V alloy, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 126 (2018), 13-17.
- [43] M. Ahmadi, Y. Karpat, O. Acar, Y.E. Kalay, Microstructure effects on process outputs in micro scale milling of heat treated Ti6Al4V titanium alloys, *Journal of Materials Processing Technology*, 252 (2018), 333–347.
- [44] Y.H. Çelik, E. Kilickap, M. Güney, Investigation of cutting parameters affecting on tool wear and surface roughness in dry turning of Ti-6Al-4V using CVD and PVD coated tools, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 39 (2017), 2085-2093.
- [45] R. Li, A.J. Shih, Tool temperature in titanium drilling, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 129 (2007), 740-749.
- [46] T. Kivak, U. Şeker, The effect of coating materials and cutting conditions on the cutting forces in the drilling of Ti-6Al-4V alloy, *International Iron & Steel Symposium, Karabük-Turkey*, April 02–04, 855–860, 2012.
- [47] E.A. Rahim, H. Sasahara, A study of the effect of palm oil as MQL lubricant on high speed drilling of titanium alloys, *Tribology International*, 44 (2011), 309–317.
- [48] J. Pujana, A. Rivero, A. Celaya, L.N. López de Lacalle, Analysis of ultrasonic-assisted drilling of Ti6Al4V, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 49 (2009), 500–508.
- [49] M. SenthilKumar, A. Parabukarathi, V. Krishnaraj, Study on tool wear and chip formation during drilling carbon fiber reinforced polymer (CFRP)/titanium alloy (Ti-6Al-4V) stacks, *Procedia Engineering*, 64 (2013), 582-592.
- [50] Y.H. Guu, S. Deng, M. Ti-KunangHou, C.H. Hsu, K.S. Tseng, Optimization of machining parameters for stress concentration in micro drilling of titanium alloy, *Materials and Manufacturing Processes*, 27 (2012), 207–213.
- [51] O. Isbilir, E. Ghassemieh, Finite element analysis of drilling of titanium alloy, *ICM11, Procedia Engineering*, 10 (2011), 1877–1882, 2011.
- [52] J.L. Cantero, M.M. Tardío, J.A. Canteli, M. Marcos, M.H. Miguélez, Dry drilling of alloy Ti-6Al-4V, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 45 (2005), 1246-1255, 2005.
- [53] I.S. Shyha, S.L. Soo, D.K. Aspinwall, S. Bradley, R. Perry, P. Harden, S. Dawson, Hole quality assessment following drilling of metallic-composite stacks, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 51 (2011), 569–578.
- [54] E. Feldshtein, The influence of machining condition on burr shapes when drilling reach-through holes in difficult-to-cut materials, *Advanced in Manufacturing Science and Technology*, 35 (2011), 75-83.

- [55] D. Biermann, H. Hartmann, Reduction of burr formation in drilling using cryogenic process cooling, 45th CIRP Conference on Manufacturing System, Procedia CIRP 3 (2012), 85–90.
- [56] Z.G. Wang, M. Rahman, Y.S. Wong, Tool wear characteristics of binderless CBN tools used in high-speed milling of titanium alloys, *Wear*, 258 (2005), 752-758.
- [57] A.R. Zareena, S.C. Veldhuis, Tool wear mechanisms and tool life enhancement in ultra-precision machining of titanium, *Journal of Materials Processing Technology*, 212 (2012), 560-570.
- [58] T. Thepsonthi, T. zel, Experimental and finite element simulation based investigations on micro-milling Ti-6Al-4V titanium alloy: Effect of cBN coating on tool wear, *Journal of Materials Processing Technology*, 213 (2013), 532-542.
- [59] L.N. López de lacalle, J. Pérez, J.I. Llorente, J.A. Sánchez, Advanced cutting condition for he milling of aeronautical alloys, *Journal of Materials Processing Technology*, 100 (2000), 1-11.
- [60] P. Bach, G. Trmal, P. Zeman, J. Vana, J. Maly, High performance titanium milling at low cutting speed, *Procedia CIRP*, 1 (2012), 226-231.
- [61] E. nal, F. Karaca, Ti-6Al-4V alaşımının dik işlem merkezli CNC tezgahında işlenebilirliğinin araştırılması, *Doğu Anadolu Blgesi Araştırmaları*, 6 (2007), 135-139.
- [62] M. Armendia, P. Osborne, A. Garay, J. Belloso, S. Turner, P.J. Arrazola, Influence of heat treatment on the machinability of titanium alloy, *Materials and Manufacturing Processes*, 27 (2012), 457-461.
- [63] N. Muthukrishnan, P. Davim, Influence of coolant in machinability of titanium alloy (Ti-6Al-4V), *Journal of Surface Engineered Materials and Advanced Technology*, 1 (2011), 9-14.
- [64] S. Ramesh, L. Karunamoorthy, K. Palanikumar, Fuzzy modeling and analysis of machining parameters in machining titanium alloy, *Materials and Manufacturing Processes*, 23 (2008), 439-447.
- [65] N. Andriya, Dry machining of Ti-6Al-4V using PVD coated TiAlN tools, *Proceedings of the World Congress on Engineering (WCE2012)*, 3, 4-6 July London, U.K, 2012.
- [66] Y. Zhang, Z. Zhou, J. Wang, X. Li, Diamond tool wear in precision turning of titanium alloy, *Materials and Manufacturing Processes*, 28 (2013), 1061-1064.