

AISI D2 Soğuk İş Takım Çeliğinin Frezelenmesi Üzerine Bir Derleme

Şenol ŞİRİN^{1,*}, Emine ŞİRİN¹

¹ Düzce Üniversitesi, Gümüşova MYO, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, Düzce, TÜRKİYE

MAKALE BİLGİSİ

Alınma: 10.07.2020

Kabul: 27.07.2020

Anahtar Kelimeler:

AISI D2

Frezeleme

Soğuk iş takım çelikleri

ÖZET

Takım çelikleri, kullanım alanları bakımından diğer çelik gruplarına göre endüstriyel uygulamalarda daha yaygın olarak kullanılmaktadır. Takım çelikleri farklı sıcaklıklar altında şekillendirme ve işleme uygulamalarında aşınmaya karşı dayanacak şekilde geliştirilmişlerdir. Soğuk iş takım çeliği grubunda yer alan AISI D2 içeriğinde karbon elementinin az olması nedeniyle işlenebilirliği ve şekillendirilebilirliği daha kolay olarak bilinmektedir. Kolay işlenebilirliği, yüksek çatlama direnci, yüksek tokluk ve sertleşebilme özellikleri sayesinde AISI D2 imalat endüstrisinde daha çok tercih edilmektedir. Diğer yandan, AISI D2 çeliğine krom veya krom-karbür ilave edildiğinde malzemenin sertliği artmakla beraber mekanik özellikleri de iyileşmektedir. Bu bağlamda, bu çeliklerin işlenmesinde optimum işleme parametrelerinin kullanılması istenilen yüzey bütünlüğü ve ölçü tamlığının elde edilmesini kolaylaştırmakla birlikte sürdürülebilir işleme katkı sağlamaktadır. AISI D2 soğuk iş takım çeliği, plastik enjeksiyon kalıpları, kesme ve delme takımları, derin çekme ve ekstrüzyon takımları, ölçme takımları, soğuk çekme makaraları, makas bıçakları, ağaç bıçakları, kesme bıçakları, diş tarakları, çapak alma kalıpları gibi kırılmaya maruz kalan makine ekipmanlarının imalatında yaygın olarak kullanılır. Bu çalışmada, yüksek mekanik özelliklerine rağmen iyi işlenebilirlik sergileyen AISI D2 soğuk iş takım çeliğinin frezelenmesi üzerine yapılan çalışmalar derlenmiştir.

A Review on Milling of AISI D2 Cold Work Tool Steel

ARTICLE INFO

Received: 10.07.2020

Accepted: 27.07.2020

Keywords:

AISI D2

Milling

Cold work tool steels

ABSTRACT

Tool steels are more widely used in industrial applications than other steel groups in terms of their usage applications. Tool steels are developed to resist wear in shaping and machining applications under temperatures. Due to the low carbon element in the composition of AISI D2 in the cold work tool steel group, its machinability and formability are known to be easier. Thanks to its easy machinability, high cracking resistance, high toughness and hardenability, AISI D2 more preferred in the manufacturing industry. On the other hand, when chromium and chromium-carbide are added to AISI D2 steel, the hardness of material increases and its mechanical properties also improve. In this context, the use of optimum machining parameters in the processing of these steels facilitates the achievement of the desired surface integrity and dimensional accuracy and contributes to sustainable machining. AISI D2 cold work tool steel is used commonly in the manufacturing of plastic injection molds, cutting and punching tools, deep and extrusion tools, measuring tools, cold drawing rollers, scissors blades, wood blades, cutting blades, tooth combs, deburring molds. In this study, studies on the milling of AISI D2 cold work tool steel, which exhibits good machinability despite its high mechanical properties, are reviewed.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Takım çelikleri; kimyasal kompozisyonları, özellikleri, uygulama alanları ve çalışma şartları nedeniyle diğer çelik gruplarına göre çok daha zengin içeriklidir. Takım çelikleri; kesme takımları, sıcak ve soğuk deformasyon kalıpları, ölçme cihazları gibi pek çok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Takım çeliklerinde arzu edilen mekanik özellikleri yapısında bulunan Cr, V, Mo

* Sorumlu yazar, e-posta: senolsirin@duzce.edu.tr

gibi karbür yapıcı alaşım elementlerinin bulunmasına bağlıdır. Bu elementler kafes içerisinde çözünerek ve MC, M7C, M23C6, M2C, M6C tipi karbürler oluşturarak, çeliğin daha yüksek dayanıma, yüksek sertliğe, yüksek aşınma direncine ve daha iyi meneviş dayanımına sahip olmasını sağlarlar. Oluşan karbürlerin sayısı, dağılımı, tipi ve yüzde miktarı malzemenin termo-mekanik işlem geçmişi ve çalışılan sıcaklık aralığı ile birlikte, çeliğin nihai özelliklerini belirlemektedir [1]. Takım çelikleri kullanım alanına göre; soğuk iş takım çelikleri, sıcak iş takım çelikleri, yüksek hız takım çelikleri, plastik kalıp çelikleri olarak gruplandırılmaktadır.

Yüksek basma dayanımı, yüksek sertlik, yüksek çekme dayanımı, yüksek aşınma dayanımı gibi özelliklerinden dolayı soğuk iş takım çelikleri oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır [2]. AISI D2 soğuk iş takım çeliği ise istenilen şekilde malzeme sertliğine, sertleştirme işlemi sonrası düşük deformasyon ve yüksek yüzey aşınma direncine sahip olmasından dolayı; kalınlığı 6 mm'ye kadar soğuk sac kesme kalıpları, sac kesme makinalarının kesici bıçakları, şekillendirme kalıpları, delme, zımbalama, kıvrırma, bükme, ezme, şişirme, bağlantı elemanlarının soğuk şekil verme ve diş çekme kalıpları, boru ve profil haddeleme makaraları, ilaç, aşındırıcı tozların sıkıştırma kalıpları, plastik enjeksiyon kalıpları, tel çekme haddeleri ve soğuk ekstrüzyon takımları, hassas kesme kalıpları, dilme bıçakları, kabartma takımları gibi kalıpların imalatında kullanılmaktadırlar [3-5].

Ayrıca AISI D2 çeliği fiyat/performans özellikleri sayesinde en sık kullanılan soğuk iş takım çeliklerinden biridir. AISI D2 soğuk iş takım çeliğinin kimyasal kompozisyonu Tablo 1'de, fiziksel özellikleri Tablo 2'de ve standart gösterimleri ise Tablo 3'te yer almaktadır.

Tablo 1. AISI D2'nin kimyasal kompozisyonu (%) (Chemical composition of AISI D2 %)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V	Fe
1.55	0.34	0.22	0.018	0.001	11.68	0.73	0.95	Diğer

Tablo 2. AISI D2'nin fiziksel özellikleri (Physical properties of AISI D2)

Yoğunluk	Elastikiyet Modülü	Termal İletkenlik	Özgül Isı
Kg/m ³	MPa	W/m °C	J/kg °C
7.7	210	20	460

Tablo 3. AISI D2 malzemenin standart gösterimleri (Standard definitions of AISI D2 material)

AISI	DIN	ASSAB	JIS	GB
D2	1.2379	8407	SKD 11	Cr12Mo1V1

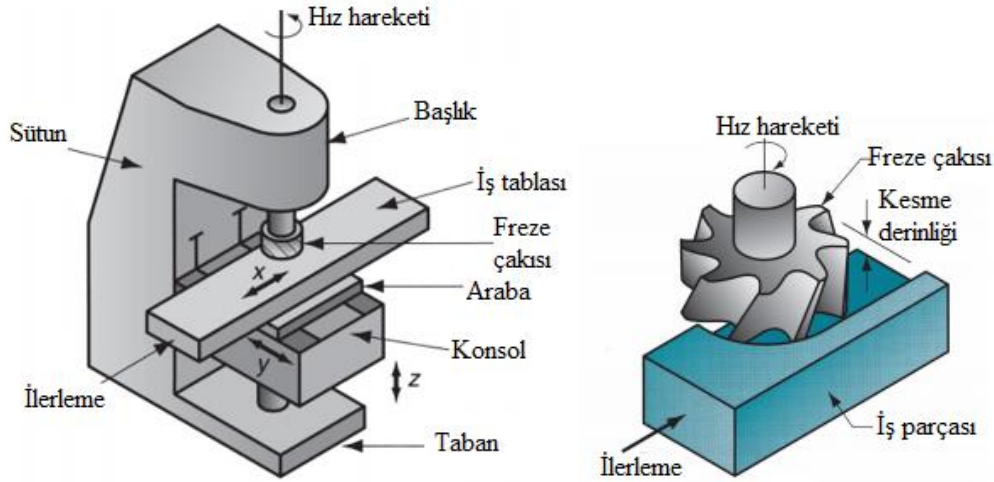
Teknolojinin ve endüstrinin gelişimiyle yüksek verimlilik, güvenlik ve daha az ağırlık gibi özelliklerin ön plana çıkmasıyla, bu takım ve kalıp çeliklerine farklı yüzey işleme çeşitleri uygulanmış ve araştırmalar bu doğrultuda hız kazanmıştır [6, 7].

AISI D2 soğuk iş takım çeliği endüstriyel uygulamalarda geniş bir yer bulmasına rağmen, literatürde frezeleme üzerine yapılan çalışmalar yeteri miktarda bulunmamaktadır. Yapılan bu çalışmada, yüksek aşınma direncine, yüksek tokluğa sahip, kesme ve ezme işlemlerinde yaygın olarak tercih edilen farklı sertlikteki AISI D2 soğuk iş takım çeliğinin frezeleme yöntemi ile işlenmesi üzerine yapılan çalışmalar incelenmiş ve sonuçları derlenmiştir. Bu çalışma ile AISI D2 malzemenin farklı şartlarda ve takımlarla işlenmesiyle elde edilen veriler derlenerek sanayi uygulamalarına referans olması ve sonuçların bir bütün haline getirilmesi amaçlanmıştır.

2. FREZELEME ÇALIŞMALARI (MILLING STUDIES)

Frezeleme, üzerinde kesici dişler bulunan kesici takımın dönme hareketiyle, iş parçasının bağlı olduğu tablanın X, Y, Z eksenlerinde ilerlemesi sonucunda meydana gelen talaş kaldırma işlemi olarak tanımlanabilir. Frezeleme diğer talaş kaldırma yöntemlerine göre (tornalama, delme vb.)

kesicideki diş sayısına bağlı olarak işleme kapasitesi yüksek olan bir yöntemdir [8]. Frezeleme işlemlerinde, sütunlu ve konsollu, yataklı tip, planya tip, kopya ve CNC freze tezgahları kullanılmaktadır. Şekil 1a'da dikey bir freze tezgahı kısımları ve iş tablası hareketleri gösterilmiştir. Frezelemede kullanılan kesici takım, freze çakısı olarak bilinir. Freze çakısının her dönüşünde kesici dişler iş parçasına girer ve çıkar. Buna kesintili kesme adı verilmekte olup, kesici dişler her dönüşte bir çarpma kuvveti ve ısıl şok çevrimine maruz kalır. Şekil 1b'de gösterilen alın frezeleme işleminde bu süreç açık bir şekilde görülebilmektedir [9]. Bu nedenle, özellikle takım malzemesi karbür ve seramik olduğunda veya yüksek sertliğe sahip iş parçalarının işlenmesinde, freze çakısı dişleri küçük pozitif veya negatif talaş açısına sahip olacak şekilde tasarlanmalıdır.



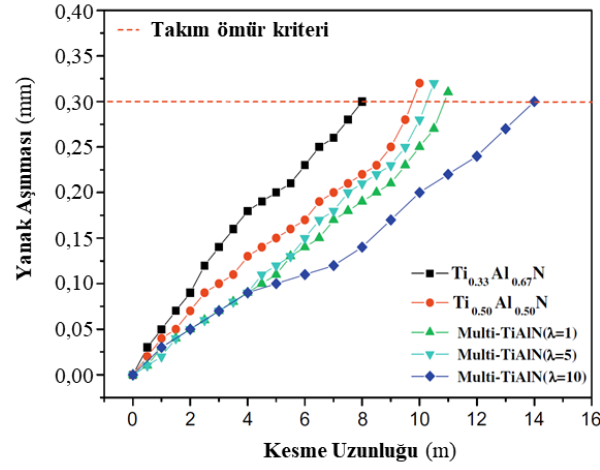
Şekil 1. a) Dikey freze tezgahı, b) Alın frezeleme [9] (a) Vertical milling machine, b) Face milling)

Soğuk iş takım çeliklerinin frezelenmesi üzerine yapılan çalışmalar aşağıda özetlenmiştir:

Şirin vd., AISI D2 soğuk iş takım çeliğini, kuru işleme şartlarında simetrik yüzey frezeleme yöntemiyle işleyerek, kesme parametrelerine bağlı olarak yüzey pürüzlülük değerini araştırmışlardır. Ayrıca Taguchi yöntemiyle optimum işleme şartlarını tespit etmişlerdir. Varyans analizi (ANOVA) sonuçlarına göre yüzey pürüzlülüğüne etki eden en önemli parametrelerin sırasıyla kesme hızı ve ilerleme miktarı olduğunu tespit etmişlerdir. Doğrulama deneyleri yaparak, optimizasyon işleminin başarıyla uygulandığı belirtilmiştir [10].

Koshy vd., sertleştirilmiş AISI D2 (58 HRC) çeliğini ve AISI H13 (52 HRC) yüksek hızda PCBN ve karbür freze takımları ile işleyerek takım ömrü ve yüzey pürüzlülüğü değerlerini incelemişlerdir. Sonuç olarak takım aşınmasında sertlik ve mikro yapının etkili olduğu ve PCBN freze takımların karbür freze takımlarına göre daha iyi performans gösterdiği tespit edilmiştir. Kimyasal yapısından dolayı sertleştirilmiş AISI D2 malzemeyi işlerken kullanılan takım ömrü, AISI H13 malzemeyi işlerken elde edilen takım ömründen daha yüksek çıkmıştır [11].

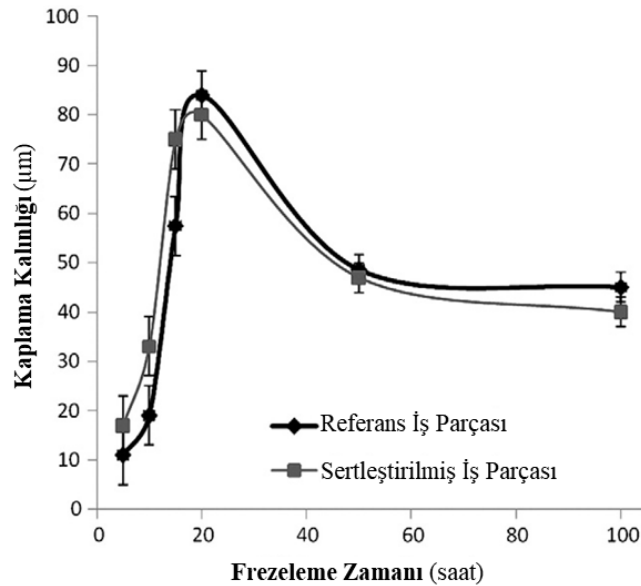
Jeong vd., AISI D2 soğuk iş takım çeliğini beş farklı kaplamaya sahip kesici takımlarla frezelemişlerdir. Sertliği 60 HRC olan AISI D2 malzemeyi 12000 dev/dak ile 0.06 mm/dev ilerleme, 10 mm aksel kesme derinliği ve 0.06 mm radyal kesme derinliği ile kuru kesme şartlarında işlemişlerdir. Elde edilen verilere göre, çok katmanlı TiAlN kaplamalı takımla en iyi takım aşınma değeri (Şekil 2) elde edildiği vurgulanmıştır [12].



Şekil 2. Kesme uzunluğuna bağlı kaplamalı takım yanak aşınması [12] (Coated tool flank wear depending on cutting length)

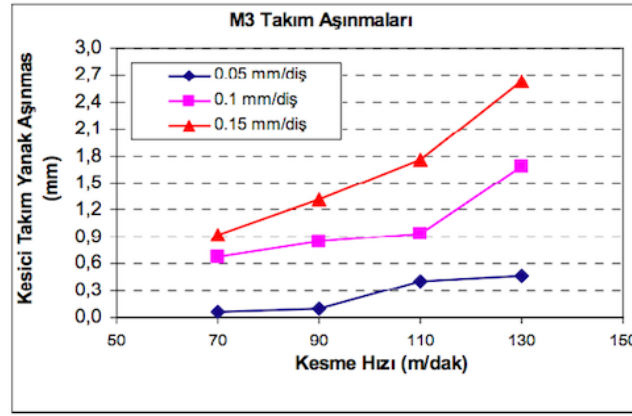
AISI D2 soğuk iş takım çeliği, freze tezgâhında kaplamalı kesici takımlarla işlenerek işleme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü ve takım sehimlerine etkileri incelenmiştir. Ortalama yüzey pürüzlülüğü değerlerinin oluşumuna en etkili parametrenin kesici takım diş başına ilerlemesi, ikinci etken parametrenin ise kesme hızı olduğu tespit edilmiştir. Bunları sırasıyla kesme derinliği, talaş açısı, kesici takım ağız sayısı ve kesici takım çapı izlediği belirtilmiştir [13].

Saba vd., AISI D2 çelik numuneleri üzerinde titanyum karbür (TiC) kaplamalı kesiciler kullanarak, kaplama kalınlığının etkisini belirlemek amacıyla 100 saate kadar frezeleme işlemi gerçekleştirmişlerdir. Frezeleme sırasında TiC kaplamalı kesici takım üzerinde aşınma, yapışma ve kırılmaların olduğu görülmüştür. Kesici takımdaki kaplamaların yapısı X-ışını kırınımı (XRD) ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelenmiştir. Çalışma sonunda, kaplamaların yapısal ve morfolojik özelliklerinin işleme süresinden etkilendiği ve alt tabakanın sertliğinin kaplama sertliğini de artırdığını gözlemlemişlerdir (Şekil 3) [14].



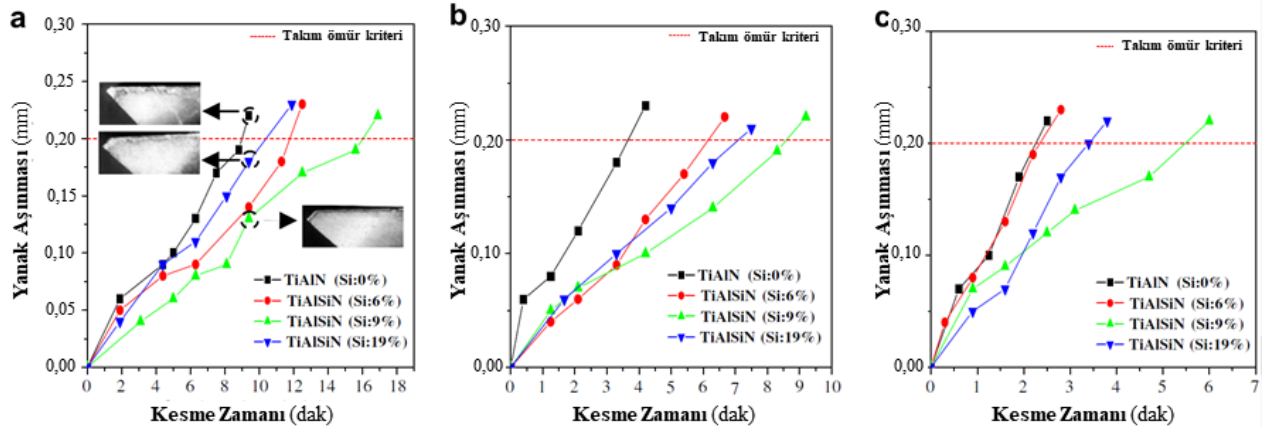
Şekil 3. Normal ve sertleştirilmiş malzemenin işlenmesinde takım kaplama kalınlığına göre frezeleme zamanı değişimi (Milling time variation according to tool coating thickness in machining of the normal and hardened material)

Şirin vd., üç farklı sertlik değerine sahip M1 (21 HRC), M2 (48 HRC) ve M3 (56 HRC) AISI D2 soğuk iş takım çelik malzemeleri, CNC dik işleme merkezinde sementit karbür kaplamalı kesici takımlarla işleyerek işleme parametrelerinin yüzey pürüzlülük değerleri ve takım aşınmalarına etkilerini incelemişlerdir. Kesme hızının ve ilerleme değerinin artışıyla kesici takım yanak aşınmasının artış eğilimi gösterdiği belirtilmiştir (Şekil 4) [15].



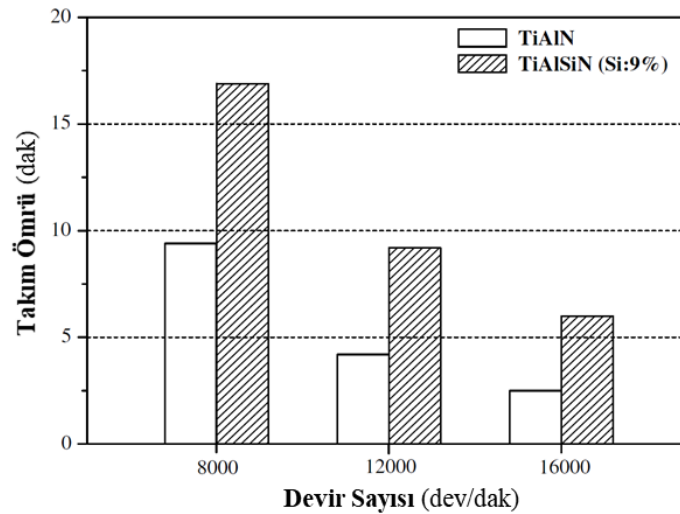
Şekil 4. Sertleştirilmiş AISI D2 malzemenin frezelenmesinde kesme parametrelerine bağlı kesici takım aşınması (Cutting tool wear depending on cutting parameters when milling hardened AISI D2 material)

Jeong vd., sertliği 62 HRC olan AISI D2 çelik malzemeyi Ti-Al-Si-N kaplı kesici takımlarla işleyerek kaplama malzemesinin takım ömrü üzerine etkilerini araştırmışlardır. İşleme parametresi olarak 8000 dev/dak (Şekil 5a), 12000 dev/dak (Şekil 5b) ve 16000 dev/dak (Şekil 5c) olmak üzere 3 farklı devir sayısı kullanılmıştır (Şekil 5).



Şekil 5. Ti-Al-Si-N kaplı takımın Si içeriğine göre takım aşınma değerleri [16] (Tool wear values according to Si content of Ti-Al-Si-N coated tool)

Şekil 5 incelendiğinde, TiAlSiN (%9) kaplamanın daha iyi performans gösterdiği anlaşılmaktadır. TiAlN ve TiAlSiN (%9) takımlarla yapılan ömür deneyleri Şekil 6'da verilmiştir.

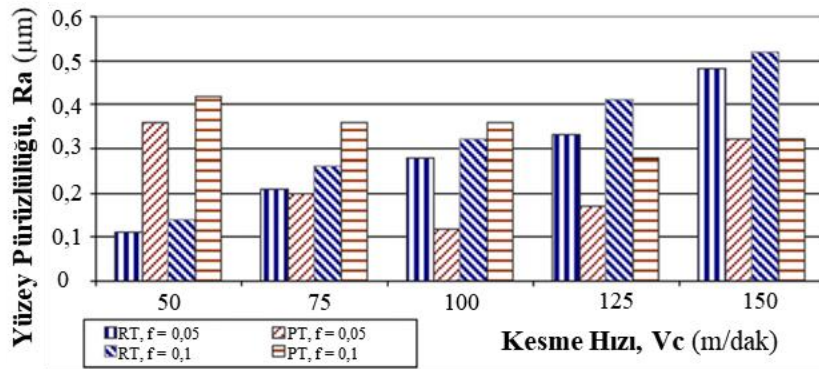


Şekil 6. Si içeriğine göre takım ömrünün karşılaştırılması [16] (Comparison of tool life by Si content)

Şekil 6 incelendiğinde, 16000 dev/dak'da Ti-Al-Si kaplı kesici takım Ti-Al-N kaplamalı kesici takımdan oldukça üstün performans gösterdiği anlaşılmaktadır.

Saedon vd., 62 HRC sertliğe sahip AISI D2 soğuk iş takım çeliğini, mikro frezeleme işlemine tabi tutarak, kesici takım ömrünü optimize etmişlerdir. Mikro frezeleme işleminde deneyler 0.5 mm çaplı TiAlN kesici takımla kuru şartlarda gerçekleştirilmiştir. Takım ömrü için kesme hızı en etkili faktör olurken ilerleme ve kesme derinliği de takım ömrünü etkileyen faktörler arasındadır [17].

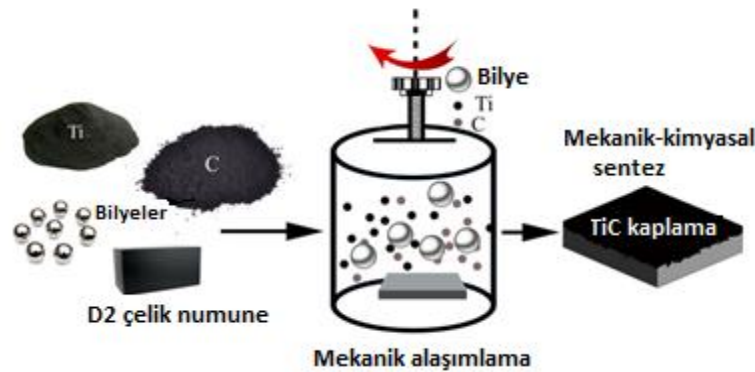
Amin ve arkadaşları sertleştirilmiş AISI D2 soğuk iş takım çeliği malzemeyi PCBN kesici takımla dik işleme merkezinde işleyerek talaş oluşumu, talaş miktarı, takım aşınması ve yüzey pürüzlülüğü açısından incelemiştir (Şekil 7). Takımda oluşan ana takım aşınma mekanizmaları plastik deformasyon, çentik aşınması ve difüzyon olarak belirlenmiştir. Kesme hızı ve ön ısıtma tekniği yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınmasında etkili parametreler olmuştur. Oda sıcaklığı, RT ve ön ısıtma PT olarak ifade edilmektedir [18].



Şekil 7. Oda sıcaklığında ve ön ısıtma yapılmış işleme şartlarında yüzey pürüzlülük değerleri [18] (Surface roughness values at room temperature and preheated machining conditions)

Şekil 7 incelendiğinde, kesme hızı arttıkça oda sıcaklığında yüzey pürüzlülük değerlerinin arttığı, ön ısıtmalı işleme şartlarında ise yüzey pürüzlülük değerlerinin düştüğü görülmüştür. İlerleme değerinin artmasıyla yüzey pürüzlülük değerinin de arttığı görülmüştür.

Saba vd., AISI D2 soğuk iş takım çeliğini bilyeler yardımıyla Ti ve C tozlarıyla mekanokimyasal yöntemle kaplayarak, kaplanmış AISI D2 malzemenin işleme özelliklerini incelemiştir. Kullanılan taşlama bilyeleri 10, 12 ve 14 mm çapında paslanmaz çelik malzemeden imal etmişlerdir. Mekanokimyasal yöntemi Şekil 8'de verilmiştir.



Şekil 8. Mekanokimyasal kaplama yöntemi prosesi [19] (Mechanochemical coating method process)

İşleme sonunda frezeleme zamanına göre mikrosertlik, çizilme sertliği ve yüzey pürüzlülüğü değerleri incelenmiştir. Kaplamalar TiC kaplama tabakası ve TiC-çelik bileşik alt katmanı olarak 2 farklı şekilde yapılandırılmıştır. Bu çalışmada, güçlü alt tabakaya yapıştırılan yoğun ve düzgün bir TiC kaplamasının optimal şartlarda başarılı sonuçlar verdiği iddia edilmiştir. Optimum şartlar, 35 saat frezeleme zamanı, sertleştirilmiş alt tabaka ve 50:1 bilye kütle toz oranı olarak belirlenmiştir [19].

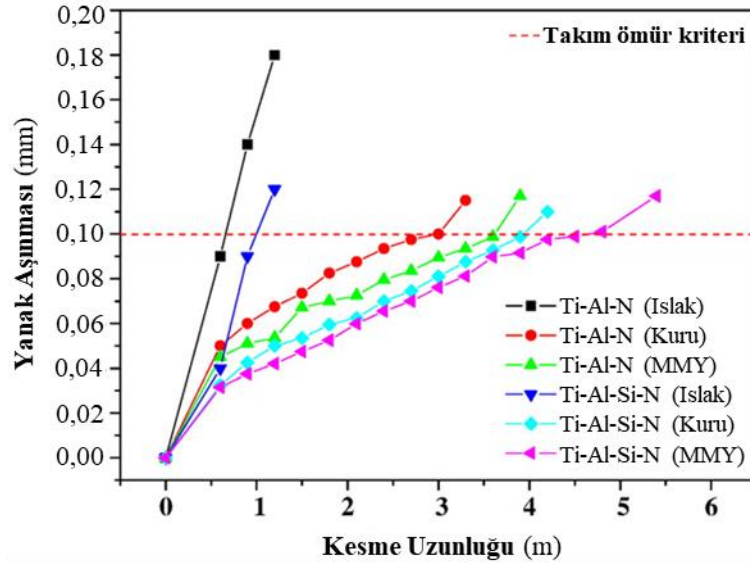
Patel ve Bhavsar, 60 HRC sert AISI D2 soğuk iş takım çeliğini AlCrN kaplamalı kesici takımla frezeleyerek kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü değerlerini incelemiştir. Kuru şartlarda yapılan deney sonuçlarından kesme kuvveti üzerinde kesme hızının daha etkili olduğunu, yüzey kalitesi

üzerinde ise ilerlemenin daha etkili olduğunu gözlemlemişlerdir. İdeal kesme hızı 125 m/dak ve ilerleme değeri 425 mm/dak olarak tespit edilmiştir [20].

Lima vd., 180 HV sertliğe sahip AISI D2 malzemeyi TiN+TiCN kaplamalı kesici takım ile kuru şartlarda frezeleyerek takım talaş arasındaki sıcaklık değerlerini deneysel olarak ve sonlu elemanlar analizi yöntemiyle ölçmüşlerdir. Deneysel sonuçlarından kesme hızı, ilerleme, aksel ve radyal kesme derinliğinin artmasıyla takım talaş arasındaki sıcaklığın artış gösterdiği tespit edilmiştir [21].

Gaitonde vd., 225 HBN sertliğe sahip AISI D2 soğuk iş takım çelik malzemeyi TiAlN kaplı kesici takım ile frezeleyerek kesme kuvveti, kesme sıcaklığı ve yüzey pürüzlülüğü değerlerini incelemişlerdir. Kuru şartlarda gerçekleştirilen deney sonuçlarına göre en düşük sıcaklık değeri düşük kesme hızı ve kesme derinliğinde ve orta ilerleme değerinde; en iyi yüzey kalitesi düşük ilerleme ve kesme derinliğinde ve orta kesme hızında elde edilmiştir [22].

Kang vd., 62 HRC sertliğe sahip malzemeyi Ti-Al-N ve Ti-Al-Si-N kaplamalı kesici takım ile işleyerek takım aşınmasını incelemişlerdir. Kesme şartları olarak kuru, ıslak ve Minimum Miktarla Yağlama (MMY) tekniklerini kullanmışlardır. MMY tekniği kullanarak geleneksel yağlama tekniğinin çevreye olumsuz etkilerini azalttığı, çalışmada ayrıca vurgulanmıştır [23]. Şekil 9'da kuru, ıslak ve MMY şartlarında kesici takım ömürleri verilmiştir. Şekil 9 incelendiğinde, kesme uzunluğunun artmasıyla orantılı olarak takım aşınmasının da artış gösterdiği bildirilmiştir. Ti-Al-Si-N kaplamalı kesici takımın ve MMY kesme şartının takım aşınmasını azaltması yönünden iyi performans gösterdiği belirlenmiştir [23].



Şekil 9. Kuru, ıslak ve MMY şartlarında $Ti_{0,75}, Al_{0,25}, N$ ve $Ti_{0,69}, Al_{0,23}, Si_{0,08}, N$ kaplamalı takımların kesme uzunluğuna bağlı yan kenar aşınması [23] (Flank wear depending on the cutting length of $Ti_{0,75}, Al_{0,25}, N$ and $Ti_{0,69}, Al_{0,23}, Si_{0,08}, N$ coated tools under dry, wet and MQL conditions)

Iqbal vd., 62 HRC sertlikteki AISI D2 soğuk iş takım çeliği malzemeyi kuru ve MMY kesme şartlarında TiAlN kaplamalı kesici takım ile frezeleyerek takım ömrü ve yüzey pürüzlülüğü değerlerini incelemişlerdir. Deneysel sonuçlarından elde edilen verilere göre takım ömrü ve yüzey pürüzlülüğü üzerine kesme hızının en etkili parametre olduğu tespit edilmiştir [24].

Ravi ve Gurusamy, 60 HRC sertliğe sahip AISI D2 soğuk iş takım çeliği malzemeyi TiN ve TiAlN kaplı kesici takım ile kuru, ıslak ve kriyojenik (LN_2) kesme şartları altında frezelemişlerdir. LN_2 soğutma şartları altında, TiAlN kaplı takım ile frezelenmesi sonucunda, TiN kaplamalı takıma göre kesme sıcaklığında %18, kesme kuvvetlerinde %13 oranında azalma olduğu belirlenmiştir [25].

3. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak tercih edilen AISI D2 soğuk iş takım çeliğinin frezelenmesi üzerine yapılan çalışmalar derlenmiştir. Frezeleme diğer talaş kaldırma yöntemlerine göre (tornalama, delme vb.) kesicideki diş sayısına bağlı olarak işleme kabiliyeti yüksek bir prosestir. Kesici takım talaş kaldırma esnasında iş parçasını aralıklı olarak kavradığından,

frezeleme yönteminde parametrelerin optimize edilmesi ve dikkate alınması önemlidir. Bu derleme çalışmasıyla, AISI D2 soğuk iş takım çeliğinin, farklı sertlik, soğutma şartı ve kesici takımlar ile frezelenmesi esnasında elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir. Araştırmalardan elde edilen sonuçlar Tablo 4'te özet olarak verilmiştir.

Tablo 4. AISI D2 malzemenin frezelenmesi üzerine araştırmaların özeti (Summary of researches on milling of AISI D2 material)

Yazar/lar Yıl	Kesme Şartları	Kesici Takım	Kesme Parametreleri	Sonuç
Şirin vd. [10] (2015)	Kuru	ADMT 120408R-F56 kodlu, WSP45	V=70-90-110 m/dak f=0.05-0.10-0.15 mm/dev Kesme derinliği=0.5 mm	ANOVA sonuçlarına göre; yüzey pürüzlülüğüne etki eden en önemli parametrelerin sırasıyla kesme hızı ve ilerleme miktarı olduğu tespit edilmiştir.
Koshy vd. [11] (2002)	Kuru	PCBN takım	V=50-100-150-200 m/dak f=0.05-0.10 mm/dış Kesme derinliği=1 mm	Takım aşınmasında sertlik ve mikro yapının etkili olduğu ve PCBN freze takımlarına göre daha iyi performans gösterdiği tespit edilmiştir.
Jeong vd. [12] (2009)	Kuru	Çok katmanlı TiAlN kaplı takım	N=12000 dev/dak f=0.05-0.10 mm/dış Kesme derinliği=0.06 mm (radyal), 10 mm (eksenel)	Çok katmanlı TiAlN kaplamalı takımla en iyi işleme değerleri elde edilmiştir.
Bakır vd. [13] (2012)	Kuru	Ti (C, N) + (Ti, Al)N + Ti 3 katman kaplamalı kesici	V=120-150-180 m/dak f=0.025-0.050-0.075 mm/dış Kesme derinliği=1.5-2-2.5 mm	Ortalama yüzey pürüzlülüğünün oluşumunda en etkili parametrenin dış başına ilerleme, ikinci etken parametrenin ise kesme hızı olduğunu tespit etmişlerdir.
Saba vd. [14] (2013)	Kuru	TiC kaplamalı bilye	N=300 dev/dak 20:1 toz/ağırlık oranı	Kaplamaların yapısal ve morfolojik özelliklerinin işleme süresinden etkilendiği ve alt tabakanın sertliğinin kaplama sertliğini artırdığını gözlemlemişlerdir.
Şirin vd. [15] (2012)	Kuru	PVD yöntemiyle TiAl+Al ₂ O ₃ +ZrN kaplı karbür kesici takım	V=70-90-110-130 m/dak f=0.05-0.1-0.15 mm/dış Kesme derinliği=0.5 mm	Kesme hızının ve ilerleme değerinin artışıyla kesici takımdaki aşınmanın da arttığını gözlemlemişlerdir.
Jeong vd. [16] (2009)	Kuru	Ti-Al-Si-N kaplı kesici takım	N=8000-12000-16000 dev/dak, f=0.05 mm/dış Kesme derinliği=0.06 mm (radyal), 10 mm (eksenel)	Ti-Al-Si kaplamalı takım, Ti-Al-N kaplamalı takıma göre oldukça üstün performans göstermiştir.
Saedon vd. [17] (2012)	Kuru	TiAlN kaplı kesici takım	V=14-20-32-50-68 m/dak f=0.78-1-1.42-2 mm/dış	Takım ömrü için kesme hızı en etkili faktör olurken ilerleme ve kesme derinliğinin takım ömrünü etkileyen diğer faktörlerden olduğu tespit edilmiştir.

Amin vd. [18] (2008)	Kuru, Oda sıcaklığında ve ön ısıtmalı	PCBN takım	V=50-75-100-125-150 m/dak f=0.05-0.1 mm/diş Kesme derinliği=1 mm	Kesme hızı arttıkça oda sıcaklığında yüzey pürüzlülük değerlerinin arttığı, ön ısıtmalı işleme şartında yüzey pürüzlülük değerlerinin azaldığı görülmüştür.
Saba vd. [19] (2016)	Kuru	TiC kaplamalı bilye	N=300 dev/dak toz/ağırlık oranı 30:1-40:1-50:1 Frezeleme zamanı :20-35-50 saat	Uygun şartlar; 35 saat frezeleme zamanı sertleştirilmiş alt tabaka ve 50:1 bilye kütle toz oranı olarak belirlenmiştir.
Patel ve Bhavsar [20] (2020)	Kuru	AlCrN kaplamalı takım	V=50-200 m/dak f=50-800 mm/min Kesme derinliği=0.06 mm, kesme genişliği 2-10 mm	İdeal kesme hızının 125 m/dak ve ilerleme değerinin 425 mm/dak olduğu tespit edilmiştir.
Lima vd. [21] (2018)	Kuru	TiN+TiCN kaplamalı takım	V=60-90-180 m/dak f=0.05-0.01-0.015 mm/dev Kesme derinliği: 12.5-25 mm (radyal), 1-2 mm (eksenel)	Kesme hızı, ilerleme, ekstenel ve radyal kesme derinliğinin artmasıyla takım talaş arasındaki sıcaklığın arttığı görülmüştür.
Gaitonde vd. [22] (2016)	Kuru	TiAlN kaplamalı takım	V=90-135-180 m/dak f=0.1-0.2-0.3 mm/dev Kesme derinliği: 4-8-12 mm	En düşük sıcaklık değeri 90 m/dak kesme hızı ve 4 mm kesme derinliği ve 0.2 mm/dev ilerlemede; en iyi yüzey kalitesi 0.1mm/dev ilerleme ve 4 mm kesme derinliği ve 135 m/dak kesme hızında elde edilmiştir.
Kang vd. [23] (2008)	Kuru-Isalak- Minimum Miktarda Yağlama	Ti-Al-N ve Ti-Al-Si-N kaplamalı takım	N=12.000 dev/dak f=0.01 mm/diş Kesme derinliği: 0.02 mm (radyal), 2 mm (eksenel)	Ti-Al-Si-N kaplamalı kesici takımın ve MMY tekniğinin takım aşınmasını azaltması yönünden iyi performans gösterdiği belirlenmiştir.
Iqbal vd. [24] (2011)	Kuru, MMY	TiAlN kaplamalı takım	V=175-275 m/dak f=0.08-0.12 mm/dev Kesme derinliği: 0.15-0.4 mm	Deney sonuçlarından takım ömrü ve yüzey pürüzlülüğü üzerine etkili parametrenin kesme hızı olduğu belirlenmiştir.
Ravi ve Gurusamy [25] (2020)	Kuru, MMY, Kriyojenik	TiN, TiAlN kaplamalı takım	V=75-100-125 m/dak f=0.02 mm/dev Kesme derinliği: 0.5 mm	LN ₂ soğutma şartında, TiAlN kaplı takımla işlemede TiN kaplamalı takıma göre kesme sıcaklığında %18, kesme kuvvetlerinde %13 azalma görülmüştür.

Bu çalışma ile AISI D2 malzemenin frezelenmesi esnasında tercih edilecek kesici takım, işleme şartları vb. parametrelerin belirlenmesinde referans olunması amaçlanmıştır. AISI D2 takım çeliğinin frezelenmesi üzerine yapılan çalışmalardan aşağıdaki sonuçlar çıkarılabilir:

1. 58 HRc sertlikteki AISI D2'nin frezelenmesinde PCBN kesici takımlar, karbür kaplı kesici takımlara göre daha iyi performans göstermiştir.
2. 60 HRc sertlikteki AISI D2'nin kuru şartlarda frezelenmesinde çok katmanlı TiAlN kaplamalı takımlar daha iyi performans göstermiştir.

3. Genel olarak, AISI D2'nin frezelenmesinde yüzey pürüzlülüğü üzerine en etkili parametrelerin sırasıyla, diş başına ilerleme, kesme hızı, kesme derinliği, talaş açısı, kesici takım sayısı ve takım çapı olduğu bildirilmiştir.
4. AISI D2'nin TiC takımlarla frezelenmesinde kesici takım kaplama kalınlığının değişimiyle frezeleme zamanının da değiştiği bildirilmiştir. Ortalama 50 µm kaplama kalınlığına sahip TiC takımlarla daha uzun frezeleme sürelerine ulaşıldığı belirlenmiştir.
5. Ticari (21 HRc) ve farklı sürelerde sertleştirilmiş (48 ve 56 HRc) AISI D2'nin kuru şartlarda frezelenmesinde kesme hızı ve ilerlemenin artmasıyla, takım yanak aşınmasında artışın olduğu bildirilmiştir.
6. 62 HRc sertlikteki AISI D2'nin frezelenmesinde Ti-Al-Si-N (Si %9) kaplamalı takımın TiAlN kaplamalı takıma göre tüm kesme parametrelerinde daha uzun ömürlü olduğu ifade edilmiştir.
7. 62 HRc sertlikteki AISI D2'nin frezelenmesinde takım ömrü üzerinde en etkili parametrenin sırasıyla kesme hızı, ilerleme ve kesme derinliği olduğu ifade edilmiştir.
8. Ticari AISI D2'nin TiN+TiCN kaplamalı kesici takımlarla frezelenmesinde takım/talaş arasındaki sıcaklık üzerinde en etkili parametrelerin sırasıyla kesme hızı, ilerleme, eksenel ve radyal kesme derinliği olduğu belirtilmiştir.
9. 62 HRc sertlikteki AISI D2'nin Ti-Al-Si-N kaplamalı kesici takımla frezelenmesinde MMY kesme şartının kuru, ıslak kesme şartlarına göre takım aşınmasını azaltmada daha iyi performans gösterdiği ifade edilmiştir.
10. 62 HRc sertlikteki AISI D2'nin TiAlN kaplı takımlarla frezelenmesinde LN₂ kesme şartının kuru ve ıslak kesme şartına göre daha iyi performans gösterdiği vurgulanmıştır.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. T.V. Pirtovšek, G. Kugler, M. Terčelj, The behaviour of the carbides of ledeburitic AISI D2 tool steel during multiple hot deformation cycles, *Materials characterization*, 83: 97-108, 2013.
2. M. Tisza, Z. Lukács, G. Gál, Integrated process simulation and die-design in sheet metal forming, *International Journal of Material Forming*, 1(1): 185-188, 2008.
3. M.D. Conci, A.C. Bozzi, A.R. Franco Jr, Effect of plasma nitriding potential on tribological behaviour of AISI D2 cold-worked tool steel, *Wear*, 317(1-2): 188-193, 2014.
4. C.K.N. Oliveira, L.C. Casteletti, A.L. Neto, G.E. Totten, S.C. Heck, Production and characterization of boride layers on AISI D2 tool steel, *Vacuum*, 84(6): 792-796, 2010.
5. E. Şirin, AISI D2 soğuk iş takım çeliğinin frezede işlenebilirliğinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Türkiye, 2010.
6. K.T. Cho, K. Song, S.H. Oh, Y.K. Lee, W.B. Lee, Enhanced surface hardening of AISI D2 steel by atomic attrition during ion nitriding, *Surface and Coatings Technology*, 251: 115-121, 2014.
7. P. Hein, J. Wilsius, Status and innovation trends in hot stamping of USIBOR 1500 P, *Steel Research International*, 79(2): 85-91, 2008.
8. Ç.V. Yıldırım, Waspaloy süper alaşımının farklı soğutma teknikleri kullanarak frezeleme yöntemi ile işlenebilirliğinin incelenmesi, Doktora Tezi, Düzce Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Düzce, Türkiye, 2017.
9. M.P. Groover, *Principles of Modern Manufacturing*, 4th ed. John Wiley & Sons, Inc., 2010.
10. E. Şirin, Y. Turgut, İ. Korkut, Ş. Şirin, Frezelemede farklı sertlikteki AISI d2 soğuk iş takım çeliğinin taguchi metoduyla yüzey pürüzlülüğünün optimizasyonu, *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 3, 132-144, 2015.
11. P. Koshy, R.C. Dewes, D.K. Aspinwall, High speed end milling of hardened AISI D2 tool steel (~ 58 HRC), *Journal of Materials Processing Technology*, 127(2): 266-273, 2002.
12. Y.G. Jeong, M.C. Kang, J.S. Kim, K.H. Kim, W.G. Kim, I.D. Park, Y.H. Jun, Mechanical behavior and cutting performance of nano-multi-layer Ti_xAl_{1-x}N coated tools for high-speed machining of AISI D2 die steel, *Current Applied Physics*, 9(3): 272-275, 2009.
13. B. Bakir, M. Kurt, G. Basmacı, O. Girit, Frezelemede kesici takım çapı, ağız sayısı ve talaş açısının yüzey pürüzlülüğü ve kesici takım sehimlerine etkileri, 3. Ulusal Tasarım İmalat ve Analiz Kongresi, Balıkesir-Türkiye, 138, 2012.
14. F. Saba, S. Raygan, H. Abdizadeh, A. Dolatmoradi, Preparing TiC coating on AISI D2 steel using mechanical milling technique, *Powder technology*, 246: 229-234, 2013.

- 15.E. Şirin, Y. Turgut, İ. Korkut, Farklı sertlikteki AISI D2 soğuk iş takım çeliğinin frezeleme işleminde kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınmasına etkisi, Politeknik Dergisi, 15(1): 9-14, 2012.
- 16.Y.K. Jeong, M.C. Kang, S.H. Kwon, K.H. Kim, H.G. Kim, J.S. Kim, Tool life of nanocomposite Ti–Al–Si–N coated end-mill by hybrid coating system in high speed machining of hardened AISI D2 steel, Current Applied Physics, 9(1): 141-144, 2009.
- 17.J.B. Saedon, S.L. Soo, D.K. Aspinwall, A. Barnacle, N. H. Saad, Prediction and optimization of tool life in micromilling AISI D2 (~62 HRC) hardened steel, Procedia Engineering, 41: 1674-1683, 2012.
- 18.A.N. Amin, S.B. Dolah, M.B. Mahmud, M.A. Lajis, Effects of workpiece preheating on surface roughness, chatter and tool performance during end milling of hardened steel D2, Journal of Materials Processing Technology, 201(1-3): 466-470, 2008.
- 19.F. Saba, E. Kabiri, J.V. Khaki, M.H. Sabzevar, Fabrication of nanocrystalline TiC coating on AISI D2 steel substrate via high-energy mechanical alloying of Ti and C, Powder Technology, 288: 76-86, 2016.
- 20.R.D. Patel, S.N. Bhavsar, Experimental investigation during end milling of AISI D2 tool steel using AlCrN coated tool, Materials Today: Proceedings, 22: 2647-2656, 2020.
- 21.H.V. Lima, A.F. Campidelli, A.A. Maia, A.M. Abrão, Temperature assessment when milling AISI D2 cold work die steel using tool-chip thermocouple, implanted thermocouple and finite element simulation, Applied Thermal Engineering, 143: 532-541, 2018.
- 22.V.N. Gaitonde, S.R. Karnik, C.H.A. Maciel, J.C.C. Rubio, A.M. Abrão, Machinability evaluation in hard milling of AISI D2 steel, Materials Research, 19(2): 360-369, 2016.
- 23.M.C. Kang, K.H. Kim, S.H. Shin, S.H. Jang, J.H. Park, C. Kim, Effect of the minimum quantity lubrication in high-speed end-milling of AISI D2 cold-worked die steel (62 HRC) by coated carbide tools, Surface and Coatings Technology, 202(22-23): 5621-5624, 2008.
- 24.A. Iqbal, N. He, L. Li, Empirical modeling the effects of cutting parameters in high-speed end milling of hardened AISI D2 under MQL environment, In Proceedings of the World Congress on Engineering, London, UK , 6-8, 2011.
- 25.S. Ravi, P. Gurusamy, Experimental investigations on performance of TiN and TiAlN coated tools in cryogenic milling of AISI D2 hardened steel. Materials Today: Proceedings, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.05.664>