



NİKEL ESASLI SÜPERALAŞIMLARIN VE TİTANYUM ALAŞIMLARININ İŞLENEBİLİRLİĞİ

1. BÖLÜM: SİNERLENMİŞ KARBÜR TAKIMLARIN PERFORMANSLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Ali Rıza MOTORCU^{1,*}

¹Uludağ Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, BURSA

ÖZET

Nikel esaslı süperalaşım ile titanyum ve alaşımları gibi gelişmiş malzemeler yüksek ısı direnç, sertlik ve aşınma dayanımı gibi özelliklerin birleşimi nedeniyle talaş kaldırma sırasında kesici takım malzemelerine ciddi güçlükler doğurmaktadır. Süperalaşımın düşük işlenebilirlik özellikleri kesici takım malzemeleri üzerinde plastik deformasyona ve hızla artan takım aşınmalarına yol açan kesme kenarına yakın oldukça yüksek termal ve mekanik gerilmelerin oluşmasına neden olmaktadır. Nikel esaslı süperalaşımın ve titanyum alaşımlarının işlenmesinde tipik aşınma tipleri burunda ve/veya talaş derinliği çizgisine yakın çentik, serbest yüzey aşınması, krater aşınması, çatlama ve ani takım kırılmalarıdır. Geliştirilmiş sertlikleri ile kaplamasız ve kaplamalı sinterlenmiş karbürler, seramikler ve kübik bor nitürler (CBN) bu süperalaşımın işlenmesinde oldukça sık kullanılmaktadır. CBN ve seramik takımlar genellikle yüksek hızlardaki sürekli kesme işlemlerinde kullanılmaktadır. Diğer taraftan sinterlenmiş karbür takımlar da nikel esaslı süperalaşımın ve titanyum alaşımlarının işlenmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Kaplamasız ve kaplamalı olmak üzere iki karbür kesici takım kategorisi bu süperalaşımın ticari işleme uygulamalarında kullanılmaktadır.

Bu çalışmada, son yıllardaki çalışmalar ve nikel esaslı süperalaşımın ve titanyum alaşımlarının işlenebilirliği ile ilgili gelişmeler sunulmuştur. Bu süperalaşımın işlenmesinde farklı kesme yöntemleri, soğutma uygulamaları, kesme kuvvetleri ve sinterlenmiş karbür takımların takım ömrü ve takım aşınma davranışları değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: İşlenebilirlik, Nikel esaslı süperalaşım, Titanyum alaşımları, Karbür kesici takım, Takım ömrü, Takım aşınması.

MACHINABILITY OF NICKEL-BASED SUPERALLOYS AND TITANIUM ALLOYS PART 1: EVALUATION OF CEMENTED CARBIDE TOOLS' PERFORMANCES

ABSTRACT

Advanced materials such as nickel based super alloys, titanium and its alloys provide serious challenge for cutting tool materials during machining due to their combinations of properties such as high thermal resistance, hardness and wear resistance. The poor machinability of superalloys subject cutting tool materials to extreme thermal and mechanical stress close to the cutting edge often leading to plastic deformation and accelerated tool wear. Typical failure modes when machining nickel based superalloys and titanium alloys are notching at the nose and/or depth of cut line, flank wear, crater wear, chipping and catastrophic tool failure. Tool materials with improved hardness like uncoated and coated cemented carbides, ceramics and cubic boron nitrides (CBN) are the most frequently used for machining these superalloys. CBN and ceramic tools are generally preferred for high speed continuously machining as smooth cut. On the other hand, cemented carbide tools are still largely used for machining the nickel based superalloys and titanium alloys. Two categories of carbide cutting tool are available for commercial machining application of these superalloys; uncoated and coated carbide tools.

In this study, recent works and advances concerning machining of nickel based superalloys and titanium alloys with carbide tools are presented. Different cutting methods, coolant applications, cutting forces and tool life and tool wear of cemented carbide tools are evaluated in the machining of these superalloys.

Keywords: Machinability, Nickel-based superalloy, Titanium alloy, Carbide cutting tool, Tool life, Tool wear.

*E-Posta: armotorcu@uludag.edu.tr

1.GİRİŞ

Yüksek sıcaklık alaşımları ya da süperalaşımlar daha iyi dayanım-ağırlık oranı ve aynı zamanda geleneksel alaşımlarla karşılaştırıldığında daha yüksek ısı ve korozyon dayanımı sağladıkları için geliştirilmişlerdir. Süperalaşımlar; uzay, türbin ve fırın parçaları, kimyasal taşıma donanımları ve petrol rafineri elemanları imalatı gibi bazı endüstrilerde daha iyi sonuçlar verdiği için tercih edilmektedir. Tüm bu uygulamalar farklı ısı ve basınç altında gerçekleştirilmekte olup bu şartlar altında özelliğini kaybetmeyecek malzemeye ihtiyaç duyulmaktadır [1, 2]. Süperalaşımlar farklı yapı ve özelliklere sahiptirler ve genel olarak aşağıdaki gibi sınıflandırılabilirler:

- Demir esaslı süperalaşımlar,
- Kobalt esaslı süperalaşımlar,
- Nikel esaslı süperalaşımlar,
- Titanyum ve titanyum alaşımları.

Demir esaslı alaşımlar, yüksek sıcaklıklarda dayanımlarını koruyamadıkları için işlenmesi en kolay süperalaşımlardır. Bu alaşımlar demir esaslı olup paslanmaz çeliklerden daha fazla miktarlarda nikel ve krom içerirler. Örneğin; A-286, Discaloy, Incolloy 801 ve ASTM A297 birer demir esaslı süperalaşımdır [1]. Demir bazlı süperalaşımlar gaz türbini motorlarında kullanım alanı bulmaktadır. Kobalt esaslı süperalaşımlar, yüksek kesme sıcaklıklarında, yüksek sıcak sertlik eğilimi gösterdiği için işlemede süperalaşımların en fazla ilgi, dikkat ve çaba gerektiren türüdür. Kobalt esaslı içerik yüksek kesme sıcaklıklarında en yüksek dayanıma neden olmaktadır. Bu alaşımlar içerik esaslı olarak anlamlı miktarlarda nikel, krom ve tungstene sahiptirler ve daha az miktarlarda molibden, niyobyum, tantalyum, titanyum ve duruma göre de demir içerirler. Stellite, Haynes 188, Haynes 25 ve AiResist 13 kobalt esaslı süperalaşımlardır [1].

Nikel esaslı alaşımlar süperalaşımların en geniş grubunu oluşturmaktadır ve işlenmesi oldukça güçtür [3-6]. Genel olarak nikel esaslı bir süperalaşımların kimyasal içeriğinde hacimsel olarak; % 38–76 oranında nikel (Ni), % 27’den fazla krom (Cr) ve % 20 kobalt (Co) bulunmaktadır [7]. Bu malzemeler yüksek korozyon dayanımı ya da yüksek sıcaklıklarda yüksek dayanımın gerekli olduğu uygulamalarda kullanılırlar [3, 4, 8-12]. Nikel esaslı süperalaşımlar üç alt kategoriye

ayrılabilirler; (i) Nikel-bakır, örneğin; Monel, (ii) Nikel-krom, örneğin; Inconel, Waspalloy, Astroloy ve (iii) Nikel-molibden-krom, örneğin; Hastelloy B, Hastelloy C.

Ticari olarak kullanılan nikel esaslı süperalaşımlar ise şunlardır: Inconel (587, 597, 600, 601, 617, 625, 706, 718, X750, 901), Nimonic (75, 80A, 90, 105, 115, 263, 942, PE 11, PE 16, PK 33, C-263), Rene (41,95), Udimet (400, 500, 520, 630, 700, 710, 720), Pyromet 860, Astroloy, M-252, Waspaloy, Unitemp AF2-IDA6, Cabot 214 ve Haynes 230 [7, 13]. Inconel 718 oldukça sık kullanılan nikel esaslı süperalaşımdır ve yaklaşık olarak % 25- 45'i döküm teknikleri uygulanarak mamül haline dönüştürülmektedir. Geri kalan kısmı ise talaş kaldırma yöntemleri kullanılarak işlenmektedir. Bu yüzdendir ki son otuz yıldır nikel esaslı süperalaşımlar üzerine yapılan çalışmalarda Inconel 718 üzerine yoğunlaşmıştır [7].

Titanyum ve titanyum alaşımları yüksek sıcaklık alaşımları olarak sınıflandırılabilirler ve bir önceki süperalaşım tiplerinin işlenebilirliğine sahiptirler. Titanyum yalnız başına oda sıcaklığında diğer metallerden daha iyi dayanım- ağırlık oranı verirler [5, 14-17]. Dört farklı tipte titanyum alaşımı mevcuttur; saf (% 99-100 Ti), alfa alaşımlar (%90-95 Ti), alfa-beta alaşımlar (% 80-90 Ti) ve beta alaşımlar (% 80 < Ti). Normalde, saf ya da alfa alaşımları işlemek en kolaydır. Titanyumla birlikte alaşım elementi olarak alüminyum, vanadyum, zirkonyum ve diğer elementler kullanılmaktadır. Titanyum alaşımlarının yüksek dayanıma sahip olması nedeniyle uçak motor ve gövdelerinde kullanılan birçok parçanın imalatında kullanılmaktadır. Aynı zamanda, korozyon ve yorulma dayanımları oldukça yüksektir. Uçak motor ve gövdelerinde, uzay sektöründe ve askeri amaçlı projelerde üretilen parçaların imalatı döküm ya da talaş kaldırma şeklinde olduğundan dolayı titanyum alaşımlarının işlenebilirliği üzerine deneysel ve teorik anlamda çalışmalar devam etmektedir [7].

Kaplamasız ve kaplamalı sinterlenmiş karbürler, seramikler ve kübik bor nitrürler (CBN) bu süperalaşımların işlenmesinde oldukça sık kullanılmaktadır. CBN ve seramik takımlar genellikle yüksek hızlardaki sürekli kesmelerde kullanılmaktadır. Diğer taraftan düz ve karma esaslı sinterlenmiş karbür takımlar da nikel esaslı süperalaşımların ve titanyum alaşımlarının işlenmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Düz karbürler hacimsel olarak % 6 Co (kobalt) ve % 94 ise WC (tungsten karbür) içermekte ve Co karışım oranı % 5-12 aralığında olmaktadır.

Karma karbür uçlar ise TiC (titanyum karbür), TaC (tantalyum karbür) ya da NbC (niyobyum karbür) içermektedirler. TiC (titanyum karbür), TiN (titanyum nitrür) ve Al₂O₃ (Alüminyum oksit) gibi kaplama malzemeleri ise karbür takımların var olan özelliklerini geliştirmektedir. İşlenebilirlik oranları düşük olan bu süperalaşımların işlenmesinde farklı kesici takım kaliteleri farklı performanslar sergilemektedir. Uygun işleme şekillerinin seçilmesi, farklı soğutma uygulamaları, en yüksek takım ömrünü verecek optimum kesme parametrelerinin belirlenmesi, takım aşınma mekanizmalarının tanımlanması ve kesme kuvvetlerinin ölçülmesi vb. çalışmalarla bu malzemelerin işlenebilirlik oranları arttırılmaktadır. Yapılan çalışmalar incelendiğinde bu süperalaşımların işlenebilirlik oranlarının oldukça iyileştirildiği görülmektedir.

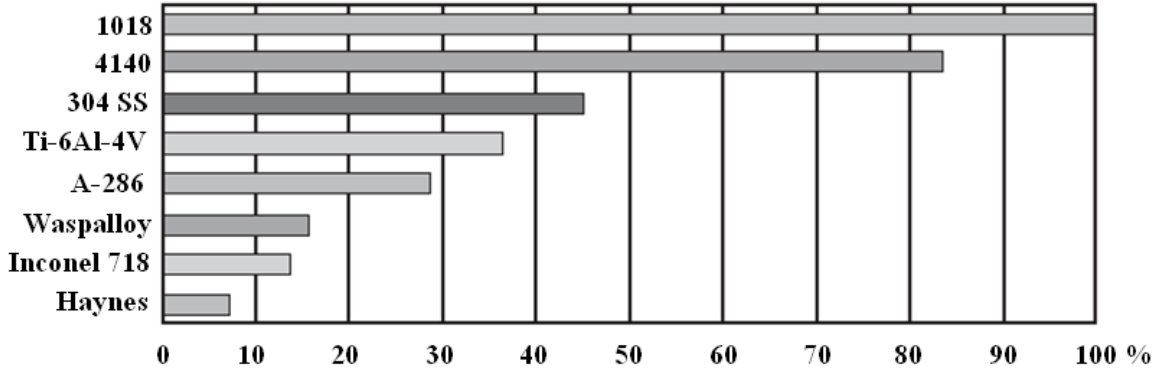
Bu çalışmada, literatürde süperalaşımların işlenebilirliği üzerine yapılan çalışmalar incelenerek bu malzemelerin işlenmesinde kullanılan kaplamasız ve kaplamalı sinterlenmiş karbür takımların performansları değerlendirilmiştir. Frezeleme üzerine yapılan çalışmaların değerlendirilmesi çoğunluktadır. Bu çalışmanın tamamlayıcısı olan bir sonraki çalışmada ise seramik ve CBN takımların performansları değerlendirilecektir.

2. SÜPERALAŞIMLARIN İŞLENEBİLİRLİK PROBLEMLERİ

İşlenebilirlik; kesme hızı, ilerleme miktarı ve talaş derinliği gibi kesme şartlarını içeren bir talaş kaldırma işleminde malzemeyi işlemekteki kolaylık ya da zorluk olarak ifade edilebilir. Bir malzemenin işlenebilirliği; takım ömrü, yüzey pürüzlülüğü ve kesme kuvveti gibi bileşenler ölçülerek tanımlanabilir. Çeliklerle ya da paslanmaz çeliklerle karşılaştırıldıklarında süperalaşım malzemelerin işlenebilirliği çok daha zordur [5, 7, 18]. Bu malzemelerde bulunan bazı elementler (Ni, Co, Cr, Ti) işlemeye karşı yüksek dayanım ve korozyon direnci oluşturmaktadır. Tipik olarak daha yüksek nikel içeriğinde işlemek daha zordur. Çünkü nikel ya da kobalt içeriği ya da titanyum bileşenleri parçaya sıcak sertlik eğilimi sağlamaktadır. Nikel esaslı süperalaşımların mikroyapısının içinde hali hazırda bulunan sert aşındırıcı karbürler (örneğin; MC, M₂₃C₆) takım aşınmasının oluşmasına sebep olan abrasif aşınma oluşumunu sağlarlar. Nikel esaslı süperalaşımların östenitik matrisi işleme sırasında hızlı sertleşmeye sebep olur. Bu, kesme derinliği hattındaki aşınmasının temel sebebi olmaktadır [7]. Kesme işlemi sırasındaki yüksek dinamik kayma dayanımı, kayma geriliminin bölgeselleşmesiyle ve titanyum alaşımlarının işlenmesinde kesici takımın çentiklenmesini başlatan aşındırıcı testere dışı

kenarların oluşumuyla sonuçlanmaktadır. Yüksek sıcaklıklarda dayanım ve sertlik özellikleri nedeniyle kesme işleminde kesici takım deformasyona uğramaktadır. Sırf bu nedenlerle, özel tasarlanmış takım malzemeleri, geometrileri ve kesme şartları kullanılmaktadır [1]. Bu malzemelerin işlenmesindeki yüksek kesme kuvveti ve yüksek sıcaklık kombinasyonu aşınan takım kenarı boyunca çatlama ve deformasyona sebep olur. Buna ek olarak, bu malzemelerin çoğunda, sıcak sertlik hızlı bir şekilde meydana gelmektedir. İşleme sırasında oluşan sertleşmiş bir yüzey, talaş derinliği çizgisindeki (hattındaki) takımın çentiklenmesinin bir sonucu olabilir ve aynı zamanda yorulma dayanımı ve parçanın geometrik doğruluğunu etkileyebilir [3, 4, 8-10, 16, 17]. Düşük termal difüzyon gücü, yüksek termal eğilime sahip olan takım burnundaki kesme sıcaklıklarının (≥ 1000 °C) bölgeselleşmesine öncülük etmektedir. İş parçasının takım kesme kenarına kaynak olmasıyla şekillenen sabit durumda olmayan yapışma-BUE (Built-Up-Edge) oluşumu sonucu işlenmiş yüzeylerin bozulmasına neden olmaktadır. Titanyum alaşımlarının yüksek sıcaklıklarda birçok takım malzemesiyle reaksiyona girmesi nedeniyle artan takım aşınması oluşmaktadır. Süperalaşımlar ve titanyum alaşımlarındaki metalürjik değişiklikler malzemeleri oksidasyon ve korozyona karşı daha güçlü, dayanıklı ve/veya daha dayanıklı yapmakta iken bu malzemelerin işlenmesini güçleştirmektedir. Titanyum alaşımları da benzer eğilim sergilerler. Titanyum işlenirken oluşan kesme kuvvetleri çeliğin kesme kuvvetlerinden çok az daha yüksektir. Titanyum alaşımlarının sahip olduğu özellikler nedeniyle bu malzemelerin işlenmesi aynı sertliğe sahip bir çeliğin işlenmesinden daha güçtür [14-17]. Örneğin; titanyumun sahip olduğu düşük ısıl iletkenlik kesme sırasında oluşan ısının çoğunun kesme kenarında yoğunlaşmasına neden olur. Aynı zamanda, yine titanyumun sahip olduğu düşük elastikiyet modülü nedeniyle kaba talaş işlemlerinde sapma ve titreşimler oluşmaktadır. Titanyum alaşımları en fazla tepkime gösteren süperalaşımlar arasında yer almaktadır. Titanyumun bu tepkime gösterme doğası takımla arasında kimyasal etkileşimin oluşmasına neden olarak takımın krater oluşumuna sebep olmaktadır [14, 15].

Şekil.1’de bazı süperalaşımların deneysel çalışmalar sonucu elde edilmiş işlenebilirlik indeksleri verilmiştir [1]. Şekil.1 incelendiğinde bir 4140 çeliğinin işlenebilirlik indeksi % 80’den fazla iken yukarıda bahsedilen yapısal özellikleri nedeniyle örneğin nikel esaslı süperalaşım Inconel 718’in işlenebilirlik indeksi % 10-15 civarında kalmıştır.



Şekil 1. Süperalaşımların işlenebilirlik indeksleri [1].

Gelişmiş kesici takımların üretilmesine olanak sağlayan kesici takım teknolojisindeki süreçle birlikte soğutma sistemlerinin de gelişmesiyle yüksek ısıl ve kimyasal kararlılıkta süperalaşımların işlenmesi mümkün olmaktadır. Süperalaşımların işlenmesinde kullanılan bu gelişmiş kesici takımlar; kaplamasız ve kaplamalı karbür, seramik ve CBN takımlardır. Soğutma teknikleri ise talaş-kesici takım, takım-iş parçası arasında birinci kayma bölgesindeki sıcaklıkları en az indiren krojenik sistemler, sulu soğutma, yüksek basınçlarda soğutma ve en az miktarda yağlama ile soğutma (MQL) gibi tekniklerdir [7, 19]. Bu çalışmada, süperalaşımların işlenmesinde kullanılan bu kesici takımların performansları üzerinde soğutma uygulamalarının etkileri de değerlendirilmiştir.

3. SİNERLENMİŞ KARBÜR KESİCİ TAKIMLARIN PERFORMANSLARI

Nikel esaslı süperalaşımlar ile titanyum alaşımlarından üretilcek parçalarda, döküm ve şekil verme işlemleri sağlamış olduğu avantajlar nedeniyle tercih edilmektedirler. Bununla birlikte oldukça karmaşık şekilli parçalar çok basit bir şekilde üretilmektedir. Fakat süperalaşımlardan üretilmiş parçaların üretiminde farklı talaş kaldırma yöntemleri de uygun maliyetlerle uygulanmaktadır. Tüm işleme operasyonlarında olduğu gibi süperalaşımların işlenmesinde de kullanılacak kesici takımlar şu özelliklere sahip olmalıdır; (i) iyi aşınma dayanımı, (ii) yüksek dayanım ve tokluk, (iii) yüksek sıcaklık sertliği ve (iv) yüksek sıcaklıklarda kimyasal kararlılık [5, 7, 18].

Nikel esaslı süperalaşımların ve titanyum alaşımlarının işlenmesinde çok farklı kesici takımlar kullanılmakla birlikte bu çalışmada, kaplamasız karbür ve kaplamalı karbür takımların

performansları değerlendirilecektir.

3.1. Nikel Esaslı Süperalaşımın Kaplamasız Karbür Takımlarla İşlenebilirliği

Kaplamasız karbür takımlar talaşlı imalatta hala kullanılan en popüler takım malzemeleridir. Süperalaşımın işlenmesinde tipik olarak, % 6 kobalt kalitesi kaba işleme için ve % 6 oranındaki mikro tanecikli kobalt kalitesi ise yarı bitirme ve bitirme yüzeyi işlemleri için kullanılmaktadır. En ağır kaba işleme uygulamaları için ise, % 10 mikro yapıli kobalt kaliteleri uygundur [6]. Sinterlenmiş karbürlerle işlemede, kesme kuvvetlerini azaltmak ve yüzey zararlarını en aza indirmek için pozitif talaş açısı tercih edilir. Hızlar ise, bu takımların kaplamalılarında kullanılan hızlarla tipik olarak aynıdır ya da biraz daha düşüktür [20]. Nikel esaslı süperalaşımın işlenmesinde tavsiye edilen kesme hızı 10-30 m/dak'dır [21]. Kaplamasız sinterlenmiş karbürler yüksek kesme hızlarında nikel esaslı süperalaşımın işlenmesinde kullanılmazlar. Çünkü yüksek kesme hızlarında hızla artan oranlarda çentiklenme oluşmaktadır. Bu genellikle erken kırılmayla sonuçlanmaktadır [18, 21]. İşleme sırasında kaplamalı takımların bünyesinde oluşan yüksek ısı, yüksek iş parçası dayanımı ve aşındırıcı talaşların sebep olduğu kesme derinliğindeki çentiklenme genel problem olarak kaplamasız karbür takımlarda görülmektedir [20, 22]. Örneğin; PVD kaplı ve (TiN/TiCN/TiN, TiAlN and TiZrN) ve kaplamasız karbür takımların nikel esaslı süperalaşım, C-263'ün V=68 m/dak yüksek kesme hızında işlenmesinde kaplamalı karbürler kaplamasız takımlardan daha iyi takım ömrü performansı sergilemiştir. Kaplamasız karbür takımlarda, işleme sırasında etkili olan çentik aşınmasının yanı sıra kesme kenarında çitlamaların, kırılmaların oluştuğu ve krater aşınmasının da görüldüğü belirtilmektedir [23, 24]. Kaplamasız takımlarda kesme bölgesinde verimli bir şekilde yağlama sağlama yetersizliği nedeniyle yan yüzey ve talaş yüzeyi boyunca hareket eden talaşların hareketleri engellenmektedir bu da yan yüzey aşınmasının artmasına neden olmaktadır [23].

Inconel 718'in kaplamalı takımlarla işlenmesinde kaplama katmanı üzerinde ince pul pul dökülmeler oluşmakta iken kaplamasız takımlarda hızla artan, gerinim ve kesme bölgesindeki sıcaklıklar (V=30 m/dak'da 1100 °C) nedeniyle plastik deformasyon oluşmaktadır [22]. Diğer taraftan, kesme hızının arttırılmasıyla esas kesme kuvvetleri düşmektedir [25]. Incoloy 718'in beş farklı kesme hızıyla işlenmesine yönelik yapılan deneylerde en düşük ortalama esas kesme

kuvveti 75 m/dak kesme hızında görülmüştür. Kesme kuvvetinin, kesme hızının artışına bağlı olarak düşmesinin sebebi, akış bölgesindeki yüksek sıcaklık ve azalan temas yüzey alanı olabileceği belirtilmiştir. Kesme kuvvetindeki azalma miktarı; malzeme çeşidine, çalışma koşullarına ve çalışılan kesme hızı aralığına göre de farklılık gösterebilmektedir [6, 25, 26].

Kaplamasız karbür takımlarla kesintisiz frezeleme işlemi yapıldığında genelde düşük kesme hızları tercih edilir. Takım talaş yüzeyi üzerinde iş parçası malzemesinin adhezyonu, yüksek sıcaklıklar, termal ve mekanik şok ve gerinimler takım kenarında çatlama ve kırılmalar gibi etkin aşınma şekillerini oluşturmaktadır. Farklı kesme şartlarında nikel esaslı süperalaşımın işlenmesinde K20 uç kalitesi optimum performansı sağlamaktadır [27]. $V=25$ m/dak gibi düşük kesme hızlarında frezelemenin yapıldığı bir çalışmada, kaplamasız takımların PVD ile TiN kaplı takımlardan daha iyi takım ömrü performansı sergilediği rapor edilmiştir [3]. Örneğin; bu çalışmada, ilerleme miktarı, $f=0.08$ mm/diş seçildiğinde $T=32$ dak; $f=0.14$ mm/diş seçildiğinde ise $T=22$ dak gibi takım ömürleri elde edilmiştir. Kaplamasız takımların sağlamış olduğu bu daha iyi takım performansının sürtünmeye karşı yüksek dayanımdan kaynaklandığı belirtilmiştir. Yine, kesici takım uç yarıçapının kesici takıma kazandırmış olduğu ekstra mekaniksel dayanım da artan çatlamlara karşı dayanım sağlamıştır [3]. 80° paralel kenarlı ve talaş kırıcısız takımlarla Inconel 718 süperalaşımının işlendiği, kaplamalı ve kaplamasız takımların performanslarının karşılaştırıldığı diğer bir çalışmada ise, yine kaplamalı karbür takımlar kaplamasız karbür takımlardan daha iyi takım ömrü sergilediği görülmüştür. Her iki takım için de yan yüzey aşınmasının ise takım ömrünü sınırladığı belirtilmiştir [28].

Farklı soğutma uygulamaları da nikel esaslı süperalaşımın işlenmesinde kaplamasız karbür takımların performansını arttırmıştır. Nimonic 263'ün parmak frezeyle frezelenmesinde geleneksel sulu soğutma, sıvı azot ile krojenik soğutma ve yüksek basınçta hava ile soğutma tekniklerinin uygulandığı çalışmada yüksek basınçta soğutma uygulamasıyla takım ömrü % 275 arttırılmıştır [24].

3.2. Nikel Esaslı Süperalaşımın Kaplamalı Karbür Takımlarla İşlenebilirliği

Kaplamasız takımların kaplanmasıyla birlikte karbür takımların performansları iyileştirilmektedir. Kaplama maddesi olarak kullanılan malzemeler çok iyi bir aşınma direnci, difüzyon aşınmasına karşı yüksek dayanım, oksidasyon aşınması direnci ve yüksek sıcak sertlik

gibi mükemmel özellikler kazandırmaktadır. Kaplamalı karbür takımların kaplanmasında kimyasal buhar çökeltme (CVD) ve fiziksel buhar çökeltme (PVD) yöntemleri yoğun olarak kullanılmaktadır. CVD takımlar, daha yumuşak olan demir ve nikel esaslı Monels, Inconel 600 ve Inconel 625 gibi süperalaşımın işlenmesinde kullanılmaktadır. Uygun olmayan şartlarda süperalaşım aşırı derecede zor işlenmekte iken genellikle TiN ve TiC gibi titanyum esaslı kaplamalar oldukça verimlidirler, ancak en iyi alternatif Al₂O₃ kaplamadır. Daha dayanıklı alt maddeler genellikle çentiklenme ve çıtlamaya karşı direnç sağlamak için kullanılır [7].

PVD kaplamalar daha incedirler ve karbür için küçük bir kalıcı gerilme açığa çıkarmaktadırlar. Böylece çentiklenme ve çıtlamaya karşı takım direnci sağlamış olurlar. CVD kaplamalarla karşılaştırıldığında, PVD kaplamalar ile daha keskin kenar profili oluşturulduğundan genellikle bugünün işleme ortamlarında daha genel olarak kullanılmaktadır. Bunun anlamı şudur; PVD kaplamalar yapısı itibariyle CVD kaplamalardan daha dayanıklıdır [22]. PVD yöntemiyle % 86 WC, % 11.5 Co, % 2.5 TaC içerikli ve % 93.5 WC, % 6.0 Co, % 0.5 Cr₃C₂ içerikli iki farklı kalitede TiN kaplı karbür takımla Inconel 718'in farklı kesme şartlarında yüzey frezelemesinde, düşük kesme hızlarında işleme yapıldığında takım talaş bölgesindeki kaplama katmanının erken bir şekilde ayrılmasının TiN kaplı takımlarda engellendiği rapor edilmiştir. Hatta TiN kaplı takımlar kaplamasız takımlara göre daha iyi performans sergilemişlerdir. Bu, TiN kaplamasının sağlamış olduğu yüksek aşınma dayanımına ve kaplama katmanının sahip olduğu düşük ısı iletkenlik ve sürtünme katsayısına atfedilmiştir. Çünkü yan kesme kenarındaki katman bozulmadan kalmaktadır [3].

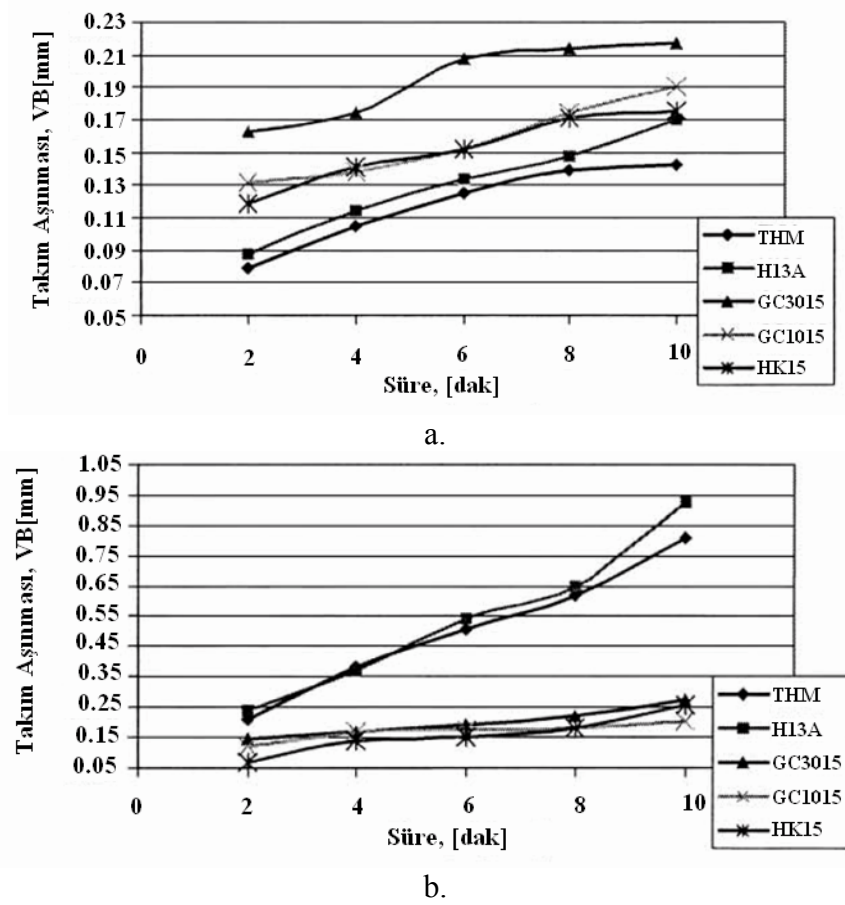
Kaplamalı takımlarda, kaplama katmanının kalkmasıyla ya da kırılmasıyla kesici takım zayıflamaktadır. Kaplama katmanının bu şekilde zayıflaması, adhesif ve kohesif etkiler nedeniyle [29]. Kaplamalardaki bu durumu modellemek için işlenebilirlik alanında yoğun kullanılan sonlu elemanlar analizi, Macginley ve Monaghan tarafından yapılan bir çalışmada yine aynı malzeme (Inconel 718) üzerinde kaplamasız ve kaplamalı karbür uçların performansını belirlemek için kullanılmıştır. Kullanılan SNMA 120408 geometrisine sahip kesici takımların kalite ve kaplamaları şöyledir [30]:

- THM; Kaplamasız karbür, (Widia),

- H13A; Kaplamasız karbür, (Sandvik),
- HK15; TiN kaplı (Widia),
- GC1015; TiN kaplı (Sandvik),
- GC3015; Al₂O₃, TiN kaplı (Sandvik).

Bölüm 3.1’de bahsedildiği gibi, nikel esaslı süperalaşımın işlenmesinde tavsiye edilen kesme hızı 10-30 m/dak’dır [21]. Şekil.2a.’da görüldüğü gibi 20 m/dak kesme hızında ISO 3685 sınırları içerisinde yer alan takım aşınması elde edilmiştir. Eğer kesme hızı Şekil.2b.’de görüldüğü gibi 40 m/dak’a çıkarıldığında kaplamalı takımlar 10 dak sınırından sonra kaplamasız takımlar ise yan yüzey aşınma sınırını (VB=0,3 mm) aşarak kullanılmaz hale gelmektedir. Şekillerden de görüleceği üzere Inconel 718’in daha yüksek kesme hızlarında kaplamalı karbür takımlarla işlenmesinde en iyi takım performansları elde edilmekte iken, düşük kesme hızlarında bu performanslar elde edilememektedir. Bu çalışma da, kaplamasız sinterlenmiş karbürlerin yüksek kesme hızlarında nikel esaslı süperalaşımın işlenmesinde kullanılmadığını doğrulamaktadır. Çünkü, artan hızla artan oranlarda çentiklenme oluşmaktadır [18, 21]. Takım aşınması ile ilgili olarak deneysel çalışma yoluyla elde edilen bu sonuçlarla ve ayrıca sonlu elemanlar yöntemiyle elde edilen modellerle gerinim dağılımı sonuçları da benzer çıkmıştır [30].

Farklı kaplamalar değişik uygulamalardaki kendilerine has avantajları nedeniyle tercih edilmektedir. Örneğin; TiAlN kaplamaların daha sert ve kimyasal olarak daha kararlı olmaları onları yüksek kesme hızlarında kullanım için elverişli kılmaktadır. TiCN kaplamalar ise bazı uygulamalarda daha uzun takım ömrü sağlamaktadırlar. Kaplamasız karbür ya da CrN/TiN kaplı takımlar yerine TiN/AlTiN kaplı takımların kullanılmasıyla kesme bölgesinde yaklaşık olarak 550 °C ölçülmüş sıcaklık düşürülebilmekte ve talaş akışı kolaylaşabilmektedir. AlTiN kaplaması takımın yüksek sıcaklık performansını da geliştirmektedir. CrN/TiN ve TiN/AlTiN kaplamalı takımlarda farklı aşınma tipleri içerisinde ilk göze çarpan aşınma burun aşınması ve kesme kenarındaki çitlamalardır. Yüksek ısı, yüksek iş parçası dayanımı ve aşındırıcı talaşların sebep olduğu kesme derinliğindeki çentiklenme de genel işleme problemi yaratmaktadır [22].



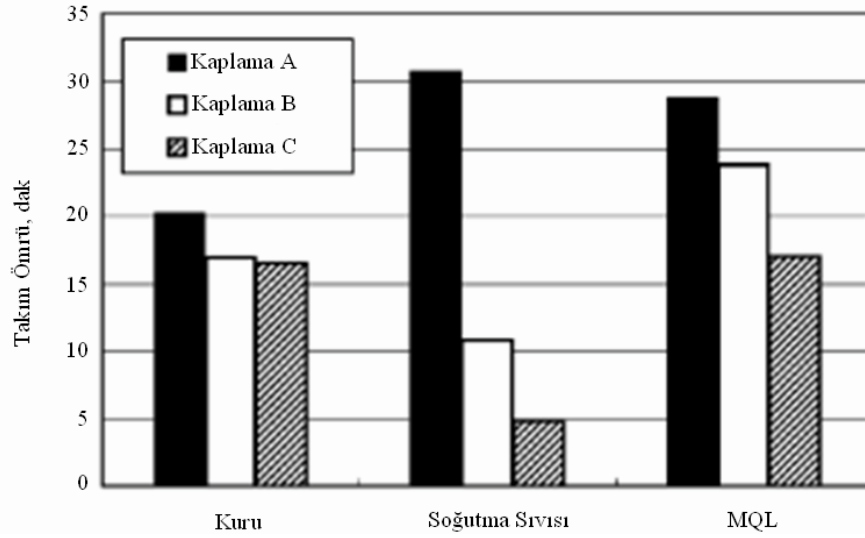
Şekil 2. Kaplamasız ve kaplamalı karbür kesicilerle işlemede oluşan takım aşınmaları, a.20 m/dak, b.40 m/dak [30].

Nikel esaslı süperalaşımın işlenmesinde, kaplama katmanı kesme sırasında oluşan kesme kuvvetlerinin düşürülmesi üzerinde de etkilidir. Örneğin; Inconel 718 süperalaşımının kaplamalı karbür takımla kuru kesme şartlarında işlenmesinde, ilerleme miktarı $f=0.1$ mm/dev ve kesme hızı $V=20-200$ m/dak seçildiğinde kesme kuvvetleri 200-600 N aralığında ölçülmüş iken kaplamasız karbür takımlarda ise aynı kesme şartlarında kesme kuvvetleri 200-1000 N aralığında ölçülmüştür [31].

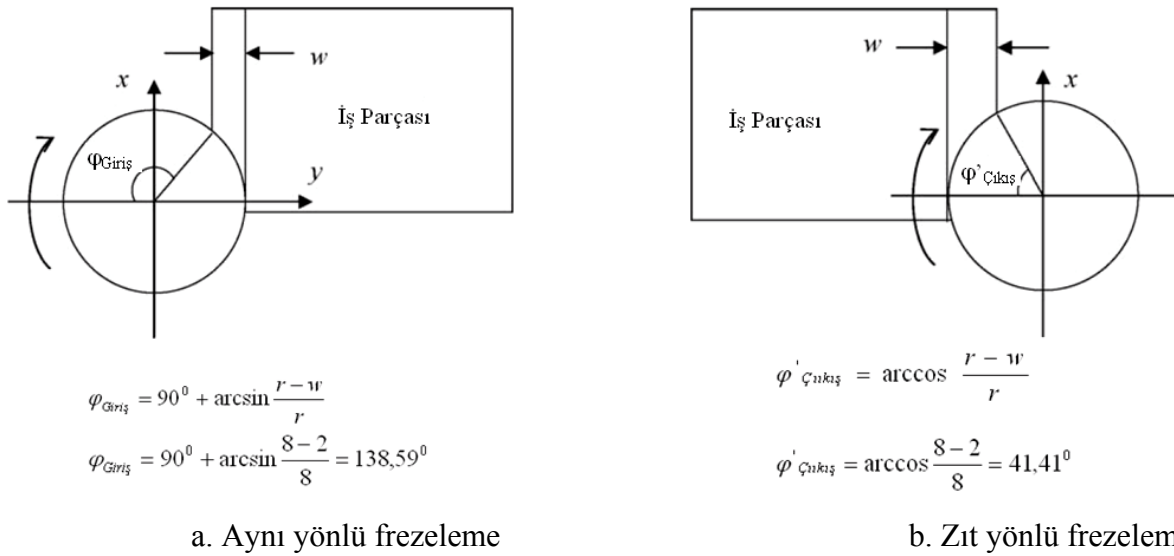
Kaplamalı takımlar ince, orta ve kaba frezeleme işlemlerinde soğutma sıvısı kullanıldığında mükemmel sonuçlar vermektedir. Kamata ve Obikawa tarafından Inconel 718 süperalaşımın bitirme yüzeyi tornalanmasında soğutma amaçlı en az miktarda yağlama yönteminin (MQL) de uygulandığı çalışmada, üç farklı kaplama katmanına sahip karbür takımların takım ömrü ve

yüzey pürüzlülük performansları araştırılmıştır. MQL; çok az miktarlardaki sentetik yağ ve çevre şartlarında eriyebilen biyolojik esaslı sentetik esterin havayla karıştırılarak takımın kesici ucuna püskürtülmesi yöntemidir. $V=1.0$ m/sn kesme hızında, TiC/ Al₂O₃ / TiN (CVD), TiN /AlN (PVD) ve TiAlN (PVD) kaplamalı karbür takımlar içerisinde TiC/ Al₂O₃ / TiN (CVD) kaplamalı takımlar en iyi takım ömrü performansını sergilemişken MQL yağlamanın uygulandığı işlemlerde TiN /AlN (PVD) kaplamalı takımlar ikinci en iyi takım ömrü performansını sergilemiştir. Diğer taraftan, TiAlN (PVD) kaplamalı takımlar tüm kesme şartlarında en düşük takım ömürlerini vermiştir. Fakat, normal soğutma sıvılı işlemlerde TiC/ Al₂O₃ / TiN (CVD) kaplamalı takımlar en iyi sonuç vermiştir (Şekil 3). Kesme hızı 1.5 m/sn'ye çıkarıldığında takım ömürleri hızlı bir şekilde düştüğünden en az miktarda yağlama yöntemi önemli bir etkiye sahip olmuştur [19, 32].

Nikel esaslı süperalaşımların işleminde tornalamanın yanı sıra diğer bir talaş kaldırma yöntemi de olan frezeleme de üretilecek parçanın geometrisi gereği yaygın olarak uygulanmaktadır. Frezeleme işlemlerinde en önemli hususlardan biri frezeleme işleminin ne şekilde yapılacağıdır. Frezeleme işlemleri; aynı yönlü ve zıt yönlü frezeleme olmak üzere ikiye ayrılırlar. Bu iki farklı frezeleme işleminde kesme süresine bağlı olarak oluşan takım aşınmaları ve kesme kuvvetleri farklılık göstermektedir [33, 34]. Inconel 718 süperalaşımının kaplamalı karbürle aynı yönlü frezelenmesinde Şekil 4'te görüldüğü gibi, kesici bir diş iş parçasına temas ettiği noktada maksimum talaş kalınlığı oluşmaktadır. Aynı yönlü frezelemede; giriş açısı kesici takım yarıçapı $r=8$ mm ve kesme genişliği $w=2$ mm alındığında $\phi_{\text{Giriş}}=138.59^\circ$, çıkış açısı yaklaşık $\phi_{\text{Çıkış}}=180^\circ$ 'dir ve talaş kalınlığı çıkış noktasında 0'dır. Zıt yönlü frezelemede ise, her dişin giriş açısı yaklaşık $\phi_{\text{Giriş}}=0^\circ$ 'dir. Diş ilk iş parçasına temas ettiğinde, başlangıçta talaş kalınlığı çok incedir, kesici akım döndüğünde talaş kalınlığı artmakta ve diş iş parçasından ayrılacağı zaman talaş kalınlığı maksimum değere ulaşmaktadır. Çıkış açısı ise; $\phi_{\text{Çıkış}}=41,41^\circ$ olarak hesaplanmaktadır (Şekil 4). Kesme derinliğinin artmasıyla kesme kuvvetleri artmaktadır [33].



Şekil 3. Üç farklı kaplama katmanına sahip takımlarla, kuru, kesme sıvılı ve az miktarda soğutma sıvısı uygulanmış işlemlerde takım ömürleri [32].



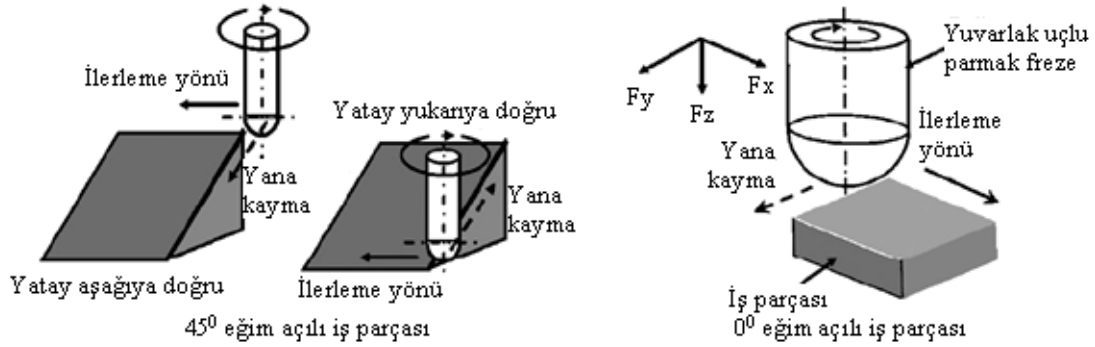
Şekil 4. Aynı yönü ve zıt yönlü frezeleme [33].

Bu frezeleme çalışmasında, her iki frezeleme yöntemi için de etkin aşınma serbest yüzey aşınması ve çatlama olarak belirtilmiştir. Takımın talaş akış yüzeyinde ise oldukça sınırlı miktarda krater aşınması da gözlenmiştir. İki frezeleme yönteminde de paso sayısı artırıldığında, kesme süresine bağlı olarak aşınma doğrusal olarak artmaktadır. Zıt yönlü frezelemede, takım aşınmasının gelişimi daha hızlı olmuştur (Şekil 4) [33].

Frezeleme işleminde diğer önemli bir unsur ise kesme şartlarının uygun seçilmesidir. (Radyal

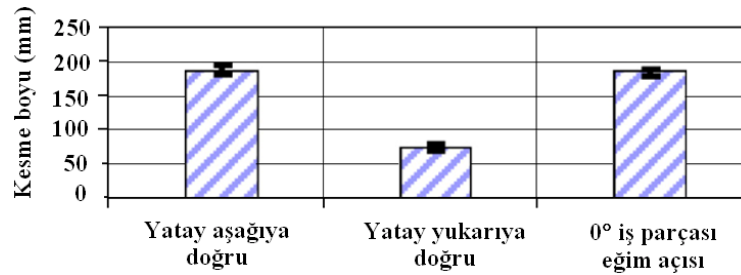
talaş derinliğinin -dalma oranı- uygun seçilmesi gibi.) Takım malzemesinin doğru seçilmesi tek başına çok iyi sonuçlar vermez. Ama uygun seçilmiş bir takım malzemesi ve geometrisi süper sonuçlar sağlayabilir. Inconel 718'in kaplamalı karbür takımlarla frezelenmesinde M30 kalitesinde CVD ile TiN/Al₂O₃/TiCN kaplı WC karbür uçlarla 0.1 mm talaş kalınlığı, % 50 radyal talaş derinliği oldukça yüksek takım ömürleri elde edilmiştir. Artan dalma oranları ile takım ömrü düşmüştür, çünkü kesme uzunluğu artmıştır, tersine düşük dalma oranlarında ise takım ömrü artmıştır. Bu da abrasyon oranı, termal ve mekanik yüklerin artmasına neden olmuştur. Aynı çalışmada, takım ömrünün kesici takım kenar radyüsünün ve talaş açısının azaltılmasına bağlı olarak azaldığı da rapor edilmiştir. Örneğin; talaş açısı 25°, kenar radyüsü 25 µm, talaş kalınlığı 0.07 mm ve dalma oranı % 12.5 olduğunda oldukça yüksek takım ömrüne ulaşılmıştır. Yine bu çalışmanın sonucunda kullanılan kaplamalı takımların hiçbirinin yüksek dalma oranı ve ilerleme miktarında Inconel 718 süperalaşımını işlemeye elverişli olmadığı rapor edilmiştir [29].

Nikel esaslı süperalaşımın yüksek hızlarda kaplamasız karbür takımlarla işlenemeyeceği, kesme hızının en fazla 30 m/dak olması gerektiği bir önceki kısımda bahsedilmişti. Fakat, Inconel 718 gibi süperalaşımın işlenmesinde, iş parçasının işlenmesi ve yüzey pürüzlülüğünün elde edilmesindeki gereksinimler ve zorluklar nedeniyle yüksek hızlarda işleme teknolojisi kapsamlı olarak kullanılmamaktadır. Uzay araçlarının motorlarındaki bir çok parça süperalaşım malzemelerden üretilmekte ve kimyasal frezelemeye işlenmektedir. Kimyasal işleme yöntemleri maliyetli olduğundan yuvarlak uçlu frezelerle frezelemenin kullanılabilirliği de araştırılmaktadır. Burada yine bu malzemelerin işlenmesinde, takım ömrü ve aşınması engeller teşkil etmektedir. Yuvarlak uçlu frezelerle takım eksenine dik ve paralel işlemler yapıldığı gibi eğimli yüzeye sahip iş parçaları da işlenebilmektedir (Şekil.5). Yapılan deneysel çalışmalarda belirtildiği gibi iş parçası üzerindeki eğimli açılarla birlikte işleme yönü de takım ömrü ve yüzey pürüzlülüğünü etkilemektedir [35].



Şekil 5. Yatay aşağıya doğru, yatay yukarıya doğru (45° eğim açısı ile) kesici oryantasyonu ve 0° iş parçası eğim açısının şematik gösterimi [35].

PVD tekniği ile kaplanmış, TiAlCrN temel katmanlara ve en üstte ise Al₂O₃ katmanına sahip karbür yuvarlak uçlu parmak frezelerle Şekil.6’da gösterilen şekillerde yapılan işlemlerde serbest yüzey aşınması ve çatlama görülmüştür. Tarama elektron mikroskobu (SEM) görüntüleriyle yapılan incelemelerde de çentiklenmenin oluşmadığı belirtilmektedir. Şekil.6’daki grafikte gösterildiği gibi yatay yukarıya doğru kesici oryantasyonu ile yaklaşık % 60 daha az kesme boyu elde edilmiştir. Yani, 45° eğim açısına sahip iş parçası üzerinde yatay aşağıya doğru kesme yapıldığında 185.2 mm kesme boyu elde edildiğinde aynı eğime sahip iş parçası üzerinde yatay şekilde yukarıya doğru kesme yapıldığında 75.4 mm kesme boyu elde edilmektedir. Genel olarak yatay şekilde aşağıya doğru yapılan işlemlerde daha iyi yüzey pürüzlülüğü, takım ömrü ve kesme kuvvetleri elde edilmektedir. Yine, 0° eğim açısına sahip iş parçasının aynı takımla işlenmesinde ise 185.9 m kesme boyu elde edilmektedir (Şekil.6) [35].



Şekil 6. Kesici oryantasyonu/iş parçası eğim açısının takım ömrü üzerine etkisi [35].

Bir başka frezeleme uygulaması olan kanal frezelemede ise, oluşmakta olan artan kesme sıcaklığı ve gerilme sertliği düşük kesme hızlarındaki zorluktan kaynaklanmaktadır. Takım

yetersizlikleri genelde çatlama ve kesme kenarındaki kırılmalar şeklinde oluşmaktadır. Orta kesme hızlarında, Inconel 718'in γ çökeltisinin özel kimyasal kararlılığı ile iş parçası malzemesi yumuşadığından kesme kuvvetlerinin azalmasına sebep olmakta ve takım ömrü artan kesme hızlarıyla iyileşmektedir. Fakat kesme hızı aşırı arttırıldığında, talaşların çoğu kanalın her iki yanına kaynak olmakta ve talaş akışı yavaşlamaktadır. Kesme sıcaklığı çok hızlı bir şekilde artma göstermekte ve kesici takımda plastik deformasyon oluşmaktadır. Dolayısıyla, nikel esaslı süperalaşım Inconel 718'in yüksek hızlarda parmak freze çakısıyla frezelenmesinde iki önemli problem ilk olarak gözlenmektedir. Bunlar; yüksek kesme sıcaklığı ve talaşın kontrolündeki güçlüktür. Bu nedenle, Inconel 718'in frezelenmesinde uygun bir kesme hızı aralığının seçilmesinin doğru olacağı sonucuna varılmaktadır. Diğer taraftan; ilerleme miktarı parmak frezeleme ile frezelemede anlamlı bir etkiye sahip olmamaktadır [36].

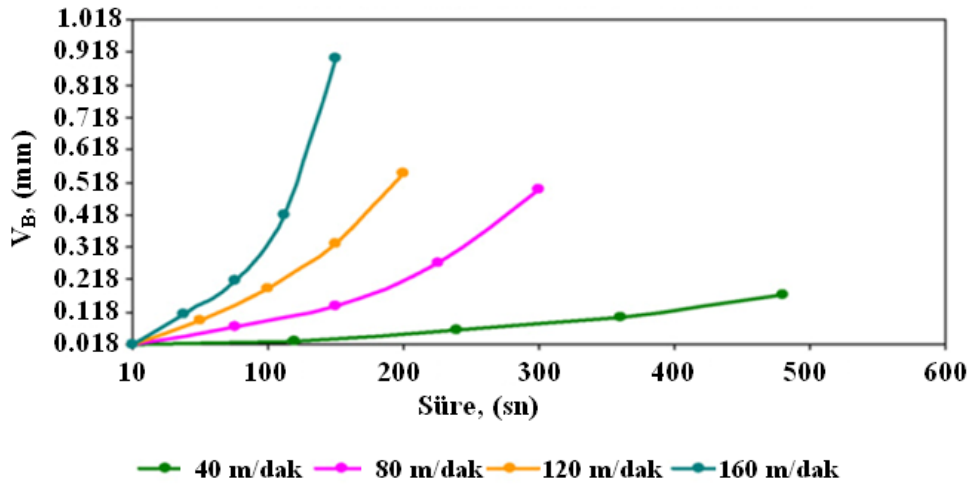
Matkapla delme işlemi de talaş kaldırma işlemleri içerisinde oldukça geniş alanda kullanılmaktadır. Süperalaşımın özellikle de nikel esaslı süperalaşımın ve titanyum alaşımının işlenebilirliği üzerine yapılan çalışmalar incelendiğinde tüm çalışmaların frezeleme ve tornalama üzerine yoğunlaştığı görülmekte ve matkapla delme üzerine yapılan çalışmalar oldukça kısıtlı kaldığı görülmektedir. Matkapla delme işlemi ekonomik olması ve mekanik parçaların üretiminde genellikle sonlara doğru gerçekleştirilen bir işlem olması nedeniyle önemini korumaktadır. Inconel 718'in TiAlN kaplamalı karbür matkapla delinmesi üzerine yapılan deneysel çalışmada takım ve iş parçası ara yüzeyindeki aşırı sürtünme kuvvetlerinden dolayı matkap aşınmasının ilk sürelerinde kesme kenarı üzerindeki kaplama katmanında yavaş yavaş aşınmaların olduğu gözlenmiştir. Artan sürtünme kuvveti ve delme kuvvetleri bu aşınmada etkili olmuştur. Daha sonra BUE oluşmuş ve daha zayıf kesme kenarında yer alan çtılamalar başlamıştır. Sonuçta, aşınmış alan içerisinde dağılmış şekilde mikro-çatlaklar gözlenmiştir. Delme işlemi süresince ara yüzeylerdeki yorulma çatlakları büyümüştür. İş parçası içerisindeki sert karbür parçacıklarının aşındırma etkisiyle yorulma çatlaklarına paralel olarak kesme kenarları kırılmıştır. Tam bu aşamada, daha uzun talaş şekilleri oluşarak verimli olmayan bir işleme gerçekleşmiştir. Uzun talaş şekilleri çıkmaya başladıktan kısa bir süre sonra matkap aşınması oluşmuş ve takım ömrünü yitirmiştir [9].

3.3. Titanyum Alaşımlarının Kaplamasız Karbür Takımlarla İşlenebilirliği

Titanyum alaşımlarının işlenmesinde de kaplamasız karbür takımlar kaplamalı olanlara göre daha iyi sonuç vermektedir. Çünkü kaplamalı karbürlerde takım ana malzemesi kaplama ile birlikte kopmaktadır. Karbür takımlar arasında özellikle K sınıfı tungsten karbür takımlar (WC/Co) tokluk için % 6'lık kobalt (Co) eklemesi ile tornalama ve frezeleme gibi genel amaçlı talaş kaldırma işlemlerinde 45 m/dak'dan daha yüksek kesme hızlarında yaygın olarak kullanılmaktadır [15, 18, 37]. Bu nedenle, WC/Co karbür takımlar ticari olarak üretilen ve titanyum alaşımlarının işlenmesinde iyi performanslar sunan kesici takımlardır [38].

Titanyum alaşımlarının kaplamasız karbür takımlarla işlenmesinde difüzyonun yaratmış olduğu ciddi problemler takım ömrünü sınırlamaktadır ve özellikle yüksek kesme hızlarında difüzyon aşınma mekanizması en etkin aşınma mekanizması olmaktadır. Takım-talaş ara yüzeyindeki difüzyon kesme sıcaklığı ile kontrol edilmektedir. Kesme sıcaklığı ise doğrudan kesme hızı ile ilgilidir. Kesme hızının doğru seçilmesi kesme sıcaklığının kontrol altına alınması demektir. Kesme hızları doğru belirlense dahi operatörün bilgi ve tecrübesi önemli rol oynamaktadır. Tezgah kullanıcı etkisini de ortadan kaldıran adaptif kontrollü işleme yöntemleri son yıllarda kesme bölgesindeki sıcaklığı görüntüleyip otomatik olarak optimum kesme parametrelerinin belirlenmesinde kullanılmaktadır [39]. Böylece, 500 °C ve üzeri sıcaklıklarda titanyum ve alaşımlarının kesici takım malzemesiyle reaksiyona girmesi önlenmiş olur [7]. Diğer taraftan, sinterlenmiş karbür takımlarla titanyum alaşımlarının işlenmesinde oluşan difüzyon aşınmasının açık bir şekilde açıklanması da gereklidir. Nitekim bu amaçla yapılan bir çalışmada da, Ti-6Al-4V titanyum alaşımının 800°C'ye kadar farklı sıcaklıklarda WC/Co karbür takımlarla işlenmesinde öncelikle abrasif, adhesif ve difüzyon aşınma mekanizmalarının sebep olduğu aşınma tiplerinin olduğu tespit edilmiştir. Difüzyon testlerinde, 400°C sıcaklıkta, WC/Co karbürünün içerisindeki W ve Co elementlerinin Ti-6Al-4V alaşımının içine nüfuz ettiği ve Ti-6Al-4V alaşımının içerisinde yer alan Ti elementinin ise WC/Co karbürünün içerisine nüfuz ettiği gözlemlenmiştir. Tesir derinliği artan kesme sıcaklığı ile artmıştır. Örneğin; 800°C sıcaklıkta tesir derinliği 20 µm'ye kadar ulaşmıştır. Düşük kesme hızlarında ise, daha düşük kesme sıcaklıkları olduğundan alaşım elementlerinin birbirleri içerisine nüfuz ettiği ile ilgili kanıt bulunamamıştır [40]. Çünkü düşük kesme hızlarında karbür takım ile titanyum arasındaki kimyasal reaksiyon önemsenmeyecek derecededir ve takım aşınması genellikle mekanik ve

termal yorgunluk ile takım üzerinde mikro kırılmalar şeklinde oluşmaktadır. Takım parçacıkları çatlama bölgesinden kopabilmektedir. Yığımlar halinde takım parçacıkları takım ve iş parçası malzemesi arasında sıkışarak abrasyon aşınması ile sonuçlanabilmektedir [7, 41]. Düşük kesme hızlarında karbür takımlarla titanyum alaşımlarının işlenmesinde abrasyon aşınma mekanizması serbest yüzey aşınması oluşumunun temel sebebidir [41]. Ti-6Al-4V titanyum alaşımının kaplamasız karbür parmak frezelenmesinde elde edilen sonuçlar bu bilgileri doğrulamaktadır [15, 18]. Bu malzemenin, farklı kesme hızlarında işlenmesinde kesme süresine bağlı olarak ortalama serbest yüzey aşınması V_B 'nin değişimi Şekil.7'de verilmiştir [42].

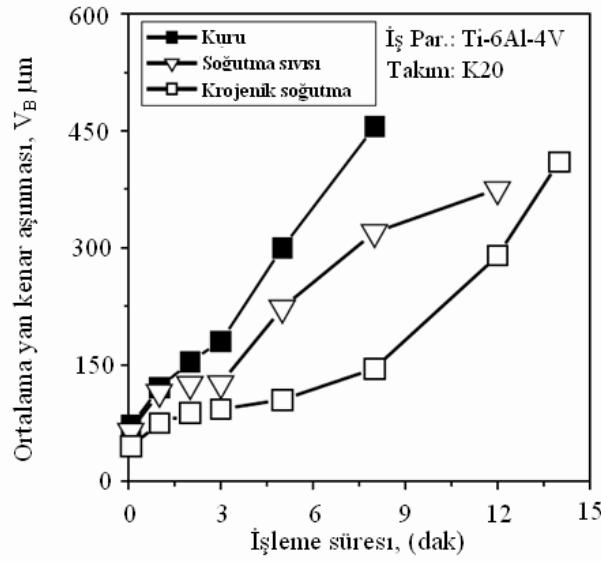


Şekil 7. Farklı kesme hızlarında kesme süresine bağlı olarak ortalama serbest yüzey aşınması V_B 'nin değişimi, $d=1$ mm, $f=0,1$ mm/diş [42].

Şekil.7'de de görüldüğü üzere titanyum alaşımlarının işlenmesinde hızlı takım aşınması oluşmaktadır. Bu sorunun üstesinden gelmek için araştırmacılar tarafından çalışılan bir konu krojenik işleme yani soğutma işleminde sıvılaştırılmış azot kullanımudur. Sıvılaştırılmış azot uygulaması kesme bölgesindeki ısıyı azaltarak takım ömürlerinin artmasını sağlamaktadır. Titanyum alaşımı Ti-6Al-4V'nin, mikro kristalli kaplamasız karbür takım ile kuru, soğutma sıvılı ve sıvılaştırılmış azot uygulaması yapılarak tornalanmasında yüksek akış hızlarında sıvı azot kesme bölgesindeki kesme sıcaklığını kontrol altına alarak adhezyon, difüzyon ve krater aşınmalarını azaltmış ve takım ömründe gözle görülebilir artış sağlamıştır [43, 44]. Krojenik soğutma sonucu oluşan takım ömründeki gelişme Şekil.8'de açıkça görülmektedir.

Karbür takımların tane boyutu da bu süperalaşımın işlenmesinde aşınma dayanımını etkilemektedir. Daha küçük tane boyutuna sahip karbür takımlar daha düşük performans sergilemektedirler. Çünkü kesme yüzeyi alanındaki tungsten karbürün (WC) çözünürlüğü arttığı için krater aşınması artmaktadır. Zayıf WC parçacıkları takım talaş yüzeyi ile talaşlara yapışmaktadır. Kesme sırasında kaybedilen daha kaba WC parçacıkları ince WC parçacıklarına göre daha fazladır ve bu da krater aşınması ile sonuçlanmaktadır. Bununla birlikte titanyum alaşımlarının frezelenmesinde daha kaba WC parçacıkları tercih edilmektedir [45].

Titanyum alaşımlarının sinterlenmiş karbür takımlarla işlenmesinde krater aşınmasının en etkin aşınma olduğu ve bu aşınma tipinin de takım ömrü ve verimliliği etkilediği bir başka çalışmada belirtilmektedir. Krater aşınması oranı ile ilgili olarak yapılan bu analitik aşınma modelinde artan ısı ile birlikte kesici takımdaki kobaltın titanyum talaşlarına difüze ettiği düşünülmüştür. Bu kobalt difüzyonu, kısmi kobalt molü, difüzyon katsayısı, ara yüzey sıcaklığı ve talaş hızının bir fonksiyonu olarak değerlendirilmiştir [46].



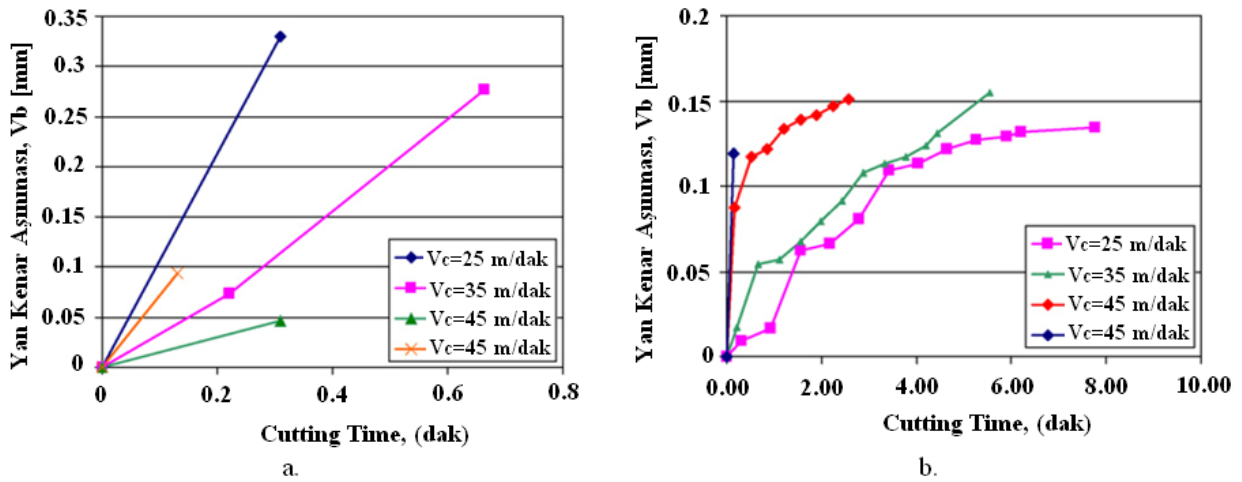
Şekil 8. $V=85$ m/dak kesme hızında ve $f=0,20$ mm/dev ilerleme miktarında yapılan tornalamalarda işleme süresine bağlı olarak ortalama serbest yüzey aşınmasının oluşumu [43, 44].

3.4. Titanyum Alaşımlarının Kaplamalı Karbür Takımlarla İşlenebilirliği

Titanyum alaşımları kaplamalı karbür takımlarla 50-100 m/dak kesme aralığında işlenirler ve tüm malzemelerde olduğu gibi kesme hızı ve ilerleme miktarı takım ömrü üzerinde sırasıyla en etkili faktörlerdir [47-50]. Kaplama, takım için iyi bir termal bariyer sağlar ve düşük sürtünme katsayısı ile kesme kuvvetlerinin düşmesini sağlar. Kesici takımın kaplamalı olması kadar kaplama katmanı sayısı ve kaplama yöntemi de takım performansı üzerinde etkilidir. Örneğin; 80-100 m/dak'da ve 0.1-0.15 mm/diş ilerleme miktarında Ti-6Al-4V alaşımının frezelenmesinde, çok katmanlı CVD ile TiCN+Al₂O₃ kaplı takımların serbest yüzey aşınma oranları aynı takımların PVD ile TiN kaplı olanlarından daha düşük bulunmuştur [7, 51-52]. Yani tek katmanlı TiN kaplı takımlar daha yüksek serbest yüzey aşınması sergilemiştir. Bu durum, çok katmanlı takımın daha yüksek aşınma direnci ve adhezyon dayanımı ile ilişkilidir [7, 53]. PVD ile kaplı karbür takımla Ti64 alaşımın yüksek kesme hızında işlenmesinde serbest yüzey aşınması, adhezyon ve termal çatlaklar etkin aşınma tipi olarak belirlenmiştir [49]. Kaplama katmanının bu etkin faydasının yanı sıra yüksek kesme hızlarında (V=95 m/dak) işlemlerde, işlenmiş parçanın yüzeylerinde beyaz katmanlar ya da plastik deformasyona uğramış katmanlar tespit edilmiştir [50].

Titanyum alaşımlarının işlenmesinde kaplama malzemesinin kaybolmasıyla ana maddeye (katmana) ulaşıldığında kaplamalı karbür takımın aşınması artmaktadır. Kesikli frezeleme işlemlerinde tabakalar halinde kaplama katmanı takımdan ayrılmaktadır. İş parçası malzemesinin doğrudan ana madde ile teması sonucu yüksek sıcaklıklar oluşmaktadır. WC-Co kaplı karbür takımlarla titanyum alaşımları işlendiğinde krater aşınması dayanımı artmaktadır çünkü WC-Co kompozit kaplama yüksek kesme hızlarında takım parçacıkları içerisine difüzyonu önlemektedir. Dolayısıyla bu kaplamalar sayesinde kesme hızı 150 m/dak'ya kadar çıkmaktadır [52]. Ti-6Al-4V titanyum alaşımının V=183 m/dak kesme hızında WC/Co esaslı matkapla delinmesinde de kesme sıvısının kullanımı matkabın takım ömrünü belirlemede kritik role sahip olmuştur. Bu kesme hızında ve f=0.051 mm/dev ilerleme miktarında yapılan soğutma sıvılı delme işleminde, aynı şartlardaki soğutma sıvısız delme işlemine göre 10 kat daha fazla takım ömrü elde edilmiştir [54]. Aynı titanyum alaşımının kaplamasız WC/Co karbür ve PVD yöntemiyle TiAlN kaplı karbür matkaplarla soğutma sıvısı kullanılarak delinmesinde, kesme kenarında düzgün dağılım göstermeyen serbest yüzey aşınması, çatlama ve şiddetli takım körelmelerinin her iki

takım için de etkin aşınma tipi olduğu rapor edilmiştir. Her iki takım da benzer şekilde oluşan kesme kenarındaki çatlama daha çok kesme hızına ve daha sonra da kesme kenarının kesinliğini kaybetmesine atfedilmiştir. Titanyumun elastikiyet modülü düşük olduğundan, delme sırasındaki tırlama ve titreşimler matkapların kesme kenarlarında gevrek kırılmalara da neden olmaktadır [55]. Aynı nikel esaslı süperalaşımın delinmesinde olduğu gibi sürtünerek aşınma da etkin aşınma tipidir [9, 55]. Şekil.9'da da görüldüğü gibi kaplamalı karbür takımlar tüm kesme hızlarında kaplamasız karbür takımlara göre daha iyi takım ömrü performansı sergilemiştir. Kaplamasız karbür matkaplarla farklı kesme hızlarında yapılan delme işlemlerinde takım ömrü, aynı şekilden tekrar görüleceği gibi hep 1 dak'nın altında çıktığı için, kesme hızının belirgin bir etkisi gözlenememiştir [55].



Şekil 9. Ti-6Al-4V titanyum alaşımının PVD yöntemiyle TiAlN kaplı ve kaplamasız matkaplarla farklı kesme hızlarında delinmesinde serbest yüzey aşınması eğrileri, a.Kaplamasız karbür, b.TiAlN kaplı karbür [55].

Titanyum ve alaşımlarının işlenmesinde kaplamalı karbür takımların performansları değerlendirilmek istenirse, özellikle CVD kaplamalı takımlar bu malzemelerin işlenmesinde pek tavsiye edilmezler. Çünkü kaplama kısa sürede kopmaktadır [15]. Nabhani tarafından CBN ve PCD takımların yanı sıra kaplamalı karbür takımların da kullanıldığı çalışmada ani durdurma deneyleri yapılmış ve krater aşınmasının olduğu deneylerde, kaplamalı karbürden diğer takımlara kıyasla daha büyük parça kopmuştur. Kopan parçaların boyutu sırasıyla büyükten

küçüğe doğru CBN ve PCD takımında koptuğu şekildedir [15, 56, 57]. Titanyum ve alaşımlarının işlenmesinde sinterlenmiş karbür (W-Ti/Ta)C-Co ve CVD yöntemiyle kaplı karbür takımların kullanılmasının tavsiye edilmediği önceki çalışmalarda belirtilmişti. Fakat Gintin ve diğerleri tarafından yapılan dört farklı çalışmada, sinterlenmiş kaplamasız karbür (W-Ti/Ta/Nb)C-Co ve CVD yöntemiyle (W- Ti/Ta/Nb)C-Co +(TiC+Ti/CN+TiN) kaplı karbür takımların kullanılmasının Ti-6242S titanyum alaşımının kuru kesme şartları altında parmak frezelenmesinde olumlu takım performansı sergilediği rapor edilmektedir. Bu durum, kesici takım alt maddesinin tane boyutuna, takımın geometrisine ve işlenen titanyum alaşımının içinde yer aldığı sınıf itibarıyla sahip olduğu malzeme özelliklerine atfedilmektedir [58-61]. Aynı zamanda, 100-125 m/dak kesme hızı aralığında talaş kaldırıldığında ise 5.82-21.2 dak aralığında takım ömürleri elde edildiği ifade edilmektedir. Talaş derinliğinin bittiği yerde bölgesel serbest yüzey aşınmasının her iki takım için de en etkin aşınma mekanizması olduğu ifade edilmektedir. Bu aşınma tipine ek olarak yine her iki takım ile kesmede de plastik deformasyon, gevrek kırılmalar, çatlamlar ve çökelmeler gözlenmiştir. Bu aşınma tiplerinin oluşmasına ise sürtünerek aşınma ve eriyerek bozulma-yayıma aşınma mekanizmalarının neden olduğu yine bu deneysel çalışmalarda rapor edilmiştir [31, 40, 58-61].

TiB₂ ise karbür takımlar için kullanılan yeni bir kaplama malzemesidir. Yüksek sertlik ve kimyasal kararlılık sağlamaktadır. TiB₂-kaplı karbür uçlar ile Ti-5Al-5Mo-2Sn-V titanyum alaşımının kuru ve krojenik soğutma ile işlenmesinde de diğer tüm çalışmalarda elde edilen sonuçları doğrular şekilde krojenik soğutmanın olumlu etkisi dikkati çekmiştir. Çalışmada bu kaplama malzemesinin titanyum alaşımlarının işlenmesi için uygun olmadığı rapor edilmiştir. Çünkü abrasyon, adhezyon ve difüzyon takımın aşınmasında en etkili nedenler olarak belirtilmiştir [48].

4. SONUÇLAR

Kaplamasız ve kaplamalı karbürler hala endüstride ekonomik olmaları ve sağladıkları performanslar nedeniyle süperalaşımların işlenmesinde sıkça kullanılmaktadır. Bu derleme çalışmasının amacı, nikel esaslı süperalaşımların ve titanyum alaşımlarının kaplamasız ve kaplamalı karbürlerle işlenebilirliği üzerine ağırlıklı olarak son yıllarda yapılan çalışmalar değerlendirilmek ve yapılacak yeni araştırmalara, talaş kaldırma üzerine faaliyet gösteren

işletmelere teknik bilgiler sunmaktır. Bu derleme çalışması sonucu elde edilen sonuçlar aşağıda gösterilmiştir:

a) Nikel esaslı süperalaşımların kaplamasız takımlarla işlenmesinde;

1. Kesme kuvvetlerini azaltmak ve yüzey zararlarını en aza indirmek için pozitif talaş açısı tercih edilmelidir.
2. Tavsiye edilen kesme hızı 10-30 m/dak'dır. Yüksek kesme hızlarında işlemlerde kullanılamazlar.
3. Kesme hızının artırılmasıyla kesme kuvvetleri düşmektedir.
4. Frezeleme işlemlerinde genelde düşük kesme hızları tercih edilir. Takım talaş yüzeyi üzerinde iş parçası malzemesinin adhezyonu, yüksek sıcaklıklar, termal ve mekanik şok ve gerinimler takım kenarında çatlama ve kırılmalar gibi etkin aşınma şekillerini oluşturmaktadır.
5. K20 uç kalitesi optimum performansı sağlamaktadır
6. Serbest yüzey aşınması takım ömrünü sınırlamaktadır.
7. Krojenik soğutma ve yüksek basınçta hava ile soğutma teknikleri takım ömrünü iki kattan fazla arttırmaktadır.

b) Nikel esaslı süperalaşımların kaplamalı takımlarla işlenmesinde;

1. PVD kaplamalar CVD kaplamalardan çentiklenme ve çıtlamaya karşı daha dayanıklıdır.
2. TiN kaplı takımlarda kaplama katmanının erken bir şekilde ayrılmaz.
3. Kaplama katmanının kalkması ya da kırılması adhesif ve kohesif etkiler nedeniyledir.
4. Farklı aşınma tipleri içerisinde ilk göze çarpan aşınma burun aşınması ve kesme kenarındaki çıtlamalardır. Yüksek ısı, yüksek iş parçası dayanımı ve aşındırıcı talaşların sebep olduğu kesme derinliğindeki çentiklenme de genel işleme problemi yaratmaktadır.
5. İnce, orta ve kaba frezeleme işlemlerinde soğutma sıvısı kullanıldığında mükemmel sonuçlar elde edilir.
6. Frezeleme işleminde etkin aşınma serbest yüzey aşınması ve çıtlamadır.
7. Frezelemede M30 kalitesinde CVD ile TiN/Al₂O₃/TiCN kaplı WC karbür uçlarla oldukça yüksek takım ömürleri elde edilmektedir. Kanal frezelemede ise çıtlama ve kesme kenarında

kırılmalar oluşmaktadır.

8. Matkapla delik delmede artan sürtünme kuvveti ve delme kuvvetleri ile birlikte, önce yapışma (BUE) oluşmakta ve çatlama başlamakta daha sonra ise dağılmış şekilde mikro-çatlaklar oluşmaktadır.
9. Soğutma sıvısının kullanılmasıyla düşük sürtünme katsayısı sağlandığından delme süresi artmakta ve işleme maliyetleri düşmektedir

c) Titanyum alaşımlarının kaplamasız karbür takımlarla işlenmesinde;

1. Kaplamalı takımlara göre daha iyi takım ömrü elde edilir. Çünkü kaplamalı karbürlerde takım ana malzemesi kaplama ile birlikte kopmaktadır.
2. Yüksek kesme hızlarında abrasif, adhesif ve difüzyon aşınma mekanizmaları en etkin aşınma mekanizmalarıdır. Düşük kesme hızlarında ise abrasyon aşınma mekanizması serbest yüzey aşınması oluşumunun temel sebebidir. Krater aşınması da oluşmaktadır.
3. Yüksek akış hızlarında sıvı azot uygulaması adhezyon, difüzyon ve çözünme aşınmalarını azaltarak takım ömrünü arttırmaktadır.
4. Daha küçük tane boyutuna sahip karbür takımlar daha düşük performans sergilemektedirler.
5. Kaba WC parçacıkları frezeleme işleminde tercih edilmektedir.

d) Son olarak, titanyum alaşımlarının kaplamalı karbür takımlarla işlenmesinde ise;

1. Kesme hızı aralığı 50-100 m/dak'dır.
2. Çok katmanlı CVD ile kaplı takımlar, PVD ile tek kaplı olanlarından daha yüksek takım ömrü verirler.
3. PVD ile kaplı takımlarda yüksek kesme hızlarında serbest yüzey aşınması, adhezyon ve termal çatlaklar etkin aşınma tipidir. WC-Co kompozit kaplama yüksek kesme hızlarında takım parçacıkları içerisine difüzyonu önlemektedir.
4. WC/Co esaslı matkapla delik delmede kesme sıvısının kullanımı soğutma sıvısız delme işlemine göre 10 kat daha fazla takım ömrü sağlamaktadır.
5. Özellikle CVD kaplamalı takımlar olmak üzere kaplamalı takımlar bu malzemelerin işlenmesinde pek tavsiye edilmezler.

Bu çalışmanın devamı olarak (ikinci bölümde) kaplamasız ve kaplamalı seramik kesici takımların performansları değerlendirilecektir.

KAYNAKLAR

1. Tungaloy, Product Selection Guide No. 204, Products for Machining High Temp Alloy Materials, Tungaloy Inc., America, <http://www.tungaloyamerica.com/pdf/High%20Temp%20web.pdf>
2. Ezugwu E.O., Improvements in The Machining of Aero-engine Alloys Using Self-propelled Rotary Tooling Technique, *Journal of Materials Processing Technology*, 185, 60–71, 2007.
3. Jawaid A., et al., Cutting Performance and Wear Characteristics of PVD Coated and Uncoated Carbide Tools In Face Milling Inconel 718 Aerospace Alloy, *Journal of Processing Technology*, 116, 2-9, 2001.
4. Darwish S.M., Machining of Difficult-to-Cut Materials with Bonded Tools, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 20, 279-289, 2000.
5. Ezugwu E.O., Key Improvements in the Machining of Difficult-to-Cut Aerospace Superalloys, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 45, 1353–1367, 2005.
6. Liu G., et al., Experimental Studies on Machinability of Six Kinds of Nickel-Based Superalloys, *International Journal of Machining and Machinability of Materials*, 1 (3), 287-300, 2006.
7. Ezugwu E.O., et al., An Overview of The Machinability of Aero-engine Alloys, *Journal of Materials Processing Technology*, 134, 233-253, 2003.
8. Alauddin M.A., et al., End Milling Machinability of Inconel 718, *Journal of Engineering Manufacture*, 210, 11-23, 1996.
9. Chen Y.C. and Liao Y.S., Study on Wear Mechanisms in Drilling of Inconel 718 Superalloy, *Journal of Materials Processing Technology*, 140, 269–273, 2003.
10. Ezugwu E.O. and Wang Z.M., Wear of Coated Carbide Tools When Machining Nickel (Inconel 718) and Titanium Base (Ti–6Al–4V) Alloys, *Tribol. Trans.*, 43, 263–268, 2000.
11. Zhao S., et al., Microstructural Stability and Mechanical Properties of A New Nickel-Based Superalloy, *Materials and Engineering A*, 355, 96-105, 2003.
12. Subhas B.K., et al., Dimensional Instability Studies in Machining of Inconel 718 Nickel Based Superalloy as Applied to Aerogas Turbine Components, *J. Eng. Gas Turbines Power*, 122 (1), 55-61, 2000.
13. Choudhury I.A. and El-Baradie M.A., Machinability of Nickel Base Superalloy: A General Review, *Journal of Materials Processing Technology*, 77 (1-3), 278-284, 1998.
14. Ribeiro M.V. et al., Optimization of Titanium Alloy (6Al-4V) Machining, *Journal of Materials Processing Technology*, 143-144, 458-463, 2003.
15. Ensarioğlu C. ve Çakır M.C., Titanyum ve Alaşımlarının İşlenebilirlik Etüdü- Bölüm 1, *Mühendis ve Makine*, 46 (546), 36-46, 2005.
16. Zoya Z.A. and Krishnamurthy R., The Performance of CBN Tools in The Machining of Titanium Alloys,

- Journal of Materials Processing Technology, 100, 80-86, 2000.
17. Erdem M.S. ve Akmandor İ.S., Uçak Motoru ve Elektrojen Gruplarındaki Gaz Türbini Teknolojisindeki İlerlemeler, Malzeme, Yüzey Teknolojileri ve İmalat Süreçlerindeki Gelişmeler (Bölüm 1), Mühendis ve Makine, 528, 1-6, 2004.
 18. Ezugwu E.O., et al., The Machinability of Nickel-Based Alloys: A Review, Journal of Materials Processing Technology, 86, 1-16, 1999.
 19. Obikawa T., et al., Micro-liter Lubrication Machining on Inconel 718, International Journal of Machine Tools and Manufacturing, 48, 1605-1612, 2008.
 20. Sharman A.R.C., et al., Workpiece Surface Integrity and Tool Life Issues When Turning Inconel 718 Nickel Based Superalloy, Machining Science and Technology, 8 (3), 399-414, 2004.
 21. Ezugwu E.O., High Speed Machining of Aero-Engine Alloys, Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 26 (1) 1-8, 2004.
 22. Ducros C., et al., Deposition, Characterization and Machining Performance of Multilayer PVD Coatings on Cemented Carbide Cutting Tools, Surface and Coatings Technology, 163 -164, 681-688, 2003.
 23. Ezugwu E.O. and Okeke, C.I. Effects of Coating Materials on the Machinability of a Nickel Base, C-263, Alloy, Tribology Transactions, 43 (3), 549 - 553, 2000.
 24. Bikramjit Podder S.P., Effect of Machining Environment on Machinability of Nimonic 263 During End Milling with Uncoated Carbide Tool, International Journal of Machining and Machinability of Materials, 3 (1,2), 104 - 119.
 25. Altın A., et al., The Effects of Cutting Speed on Tool Wear and Tool Life when Machining Inconel 718 with Ceramic Tools, Materials and Design, 28, 2518-2522, 2007.
 26. Altın A. et al., İşleme Parametrelerinden Kesme Hızının Inconel 718 Süper Alaşımın İşlenebilirliğine Etkisi, J. Fac. Eng. Arch. Gazi Univ. 21 (3), 581-586, 2006.
 27. Ezugwu E.O. and Pashby, I.R., High Speed Milling of Nickel-Based Superalloys, Journal of Materials Processing Technology, 3, 429-437, 1992.
 28. Choudhury I.A. and El-Baradie M. A, Machining Nickel Base Superalloys: Inconel 718, Proceedings of the I MECH E Part B Journal of Engineering Manufacture, 212 (3), 195-206, 1998.
 29. Krain H.R., et al., Optimization of Tool Life and Productivity When End Milling Inconel 718TM, Journal of Processing Technology, 189, 153-161, 2007.
 30. Macginley T. and Monaghan J., Modeling The Orthogonal Machining Process Using Coated Cemented Carbide Cutting Tools, Journal of Materials Processing Technology, 118, 293-300, 2001.
 31. Devillez A., et al., Cutting Forces and Wear in Dry Machining of Inconel 718 with Coated Carbide Tools, Wear, 262, 931-942, 2007.
 32. Kamata Y. and Obikawa T., High Speed MQL Finish-Turning of Inconel 718 with Different Coated Tools, Journal of Materials Processing Technology, 192-193, 281-286, 2007.
 33. Li H.Z. et al., An Experimental Study of Tool Wear and Cutting Force Variation in The End Milling of Inconel 718 with Coated Carbide Inserts, Journal of Materials Processing Technology, 180, 296-304, 2006.

34. Guimu Z., et al., Experimental Study on The Milling of Thin Parts of Titanium Alloy (TC4), *Journal of Materials Processing Technology*, 138, 489–493, 2003.
35. Aspinwall D.K., et al., The Influence of Cutter Orientation and Workpiece Angle on Machinability when High-Speed Milling Inconel 718 Under Finishing Conditions, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 47, 1839–1846, 2007.
36. Liao Y.S., et al., Behaviors of End Milling Inconel 718 Superalloy by Cemented Carbide Tools, *Journal of Materials Processing Technology*, 201, 460–465, 2008.
37. Jawaid A., et al., Tool Wear Characteristics in Turning of Titanium Alloy Ti-6246, *Journal of Materials Processing Technology*, 92-93, 329-334, 1999.
38. Calamaz M., et al., Damage Modes of Straight Tungsten Carbide in Dry Machining of Titanium Alloy TA6V, 8th International Conference on Mechanical and Physical Behavior of Materials under Dynamic Loading J. Phys. IV, France, 1265-1271, 2006.
39. Ken'ichi H., et al., Adaptive Controlled Machining of Titanium Alloy-Decision of Cutting Condition Under Constraint of Cutting Temperature, Report of the Industrial Research Institute of Ishikawa, 48, 9-14, 1999.
40. Jianxin D., et al., Diffusion Wear in Dry Cutting of Ti–6Al–4V with WC/Co Carbide Tools, *Wear*, 265 (11-12), 1776-1783, 2008.
41. Dearnly P.A. and Grearson, A.N., Evaluation of Principal Wear Mechanisms of Cemented Carbides and Ceramics Used for Machining Titanium Alloy IMI 318, *Materials Science Technology*, 2, 47-58, 1986.
42. Amin A.K.M.N., et al., Effectiveness of Uncoated WC–Co and PCD Inserts in End Milling of Titanium Alloy—Ti–6Al–4V, *Journal of Materials Processing Technology*, 192–193, 147-158, 2007.
43. Venugopal K.A., et al., Growth of Tool Wear in Turning of Ti-6Al-4V Alloy Under Cryogenic Cooling, *Wear*, 262, 1071-1078, 2007.
44. Venugopal K.A., et al., Tool Wear in Cryogenic Turning of Ti-6Al-4V Alloy, *Cryogenics*, 47, 12–18, 2007.
45. Chonghai X., et al., Research and Development of Rare-Earth Cemented Carbides, *Int. J. Refractory Met. Hard Mater.*, 19, 159-168, 2001.
46. Hua J. and Shivpuri R., A Cobalt Diffusion Based Model for Predicting Crater Wear of Carbide Tools in Machining Titanium Alloys, *J. Eng. Mater. Technol.*, 127 (1), 136-144, 2005.
47. Lopez L.N., et al., Advanced Cutting Conditions for The Milling of Aeronautical Alloys, *Journal of Processing Technology*, 100, 1-11, 2000.
48. Venugopal K.A., Turning of Titanium Alloy with Tib2-Coated Carbides Under Cryogenic Cooling, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 217 (12), 1697-1707, 2003.
49. Elmagrabi N., et al., High Speed Milling of Ti-6Al-4V Using Coated Carbide Tools, *European Journal of Scientific Research*, 22 (2), 153-162, 2008.
50. İbrahim G.A, et al., The Effect of Dry Machining on Surface Integrity of Titanium Alloy Ti-6Al-4V ELI, *Journal of Applied Science*, 9 (1), 121-127, 2009.
51. Jawaid A., et al., Evaluation of Wear Mechanisms of Coated Carbide Tools When Face Milling Titanium Alloy,

- Journal of Materials Processing Technology, 99, 266-274, 2000.
52. Fitzsimmons S.V.K., Development of CVD WC-Co Coatings, Surface Coating Technology, 137, 158-163, 2001.
 53. Ezugwu E.O. and Wang Z.M., Tool Life and Workpiece Surface Integrity Evaluation when Machining Ti6Al4V with PVD Coated Tools, Surf. Modif. Technol., IOM, 10, 414-426, 2002.
 54. Li R., et al., High-Throughput Drilling of Titanium Alloys, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 47, 63-74, 2007.
 55. Sharif S. and Rahim E.A., Performance of Coated and Uncoated-Carbide Tools when Drilling Titanium Alloy-Ti-6Al4V, Journal of Materials Processing Technology, 185, 72-76, 2007.
 56. Nabhani F., Wear Mechanisms of Ultra-Hard Cutting Tools Materials, Journal of Materials Processing Technology, 115 (3), 402-412, 2001.
 57. Nabhani F., Machining of Aerospace Titanium Alloys, Robotics and Computer Integrated Manufacturing, 17(1-2), 99-106, 2001.
 58. Nouari M. and Ginting A., Wear Characteristics and Performance of Multi-Layer CVD-Coated Alloyed Carbide Tool in Dry End Milling of Titanium Alloy, Surface and Coatings Technology, 200, 5663-5676, 2006.
 59. Ginting A. and Nouari M., Experimental and Numerical Studies on The Performance of Alloyed Carbide Tool in Dry Milling of Aerospace Material, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 46, 758-768, 2006.
 60. Haron C.H.C., et al., Performance of Alloyed Uncoated and CVD-Coated Carbide Tools in Dry Milling of Titanium Alloy Ti-6242S, Journal of Materials Processing Technology, 185, 77-82, 2007.
 61. Ginting A. and Nouari M., Optimal Cutting Conditions when Dry End Milling The Aeroengine Material Ti-6242S, Journal of Materials Processing Technology, 184,319-324, 2007.