



The effect of cutting tool and cutting speed on the surface integrity and functional properties in milling of NiTi shape memory alloys

Eren Kaya*^{ID}, İrfan Kaya^{ID}

Department of Mechanical Engineering, Eskisehir Technical University, 26555, Eskişehir, Tepebaşı, Türkiye

Highlights:

- High speed milling of NiTi is possible regarding machinability behaviors.
- Surface integrity and functional integrity of NiTi is highly cutting speed dependent.
- Use of high cutting speeds resulted in least affected transformation temperature hysteresis

Keywords:

- NiTi
- Surface integrity
- Cutting tool material
- High speed
- Functional integrity

Article Info:

Research Article
Received: 30.03.2022
Accepted: 04.12.2022

DOI:

10.17341/gazimmfd.1095871

Correspondence:

Author: Eren Kaya
e-mail:
erenkaya@eskisehir.edu.tr
phone: +90 222 321 3550

Graphical/Tabular Abstract

In this study, NiTi shape memory alloy specimen was surface milled with various cutting tool materials using a wide range of cutting speed values. The investigated functional and surface integrity indicators are listed in Figure A.

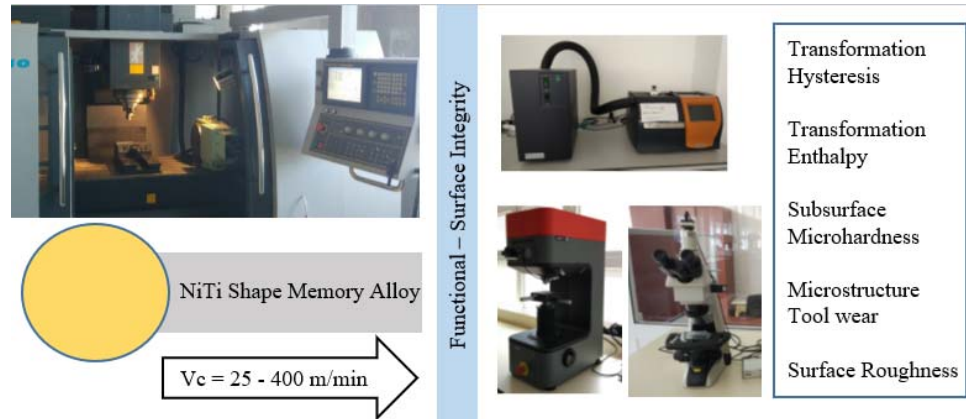


Figure A. The investigated functional and surface integrity members after surface milling of NiTi alloy

Purpose: The purpose of this study is the investigation of surface and functional integrity characteristics of machined (milling) NiTi samples employing a large cutting speed span. Accordingly, effects of cutting tool material and cutting speed parameters on these behaviors are aimed.

Theory and Methods: The NiTi samples were machined using a CNC mill (LER VQ 110). The cutting speed values of 25, 50, 75, 100, 200, 300 and 400 m/min were investigated. Surface roughness measurements were conducted after cutting with unworn cutting tools using TESA Rugosurf 20 surface profilometer. Post machining micro hardness behavior was measured up to 200 μm depth from machined surface using Struers Duramin 4 microhardness tester. Functional integrity of the machined samples were evaluated by the measurements of transformation enthalpy and transformation hysteresis. TA instruments DSC-25 differential scanning calorimetry device was used for this purpose (heating and cooling rate of 10 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$).

Results: Increase of cutting speed over 100 m/min yielded better surface quality except for the coated carbide tool. The transformation enthalpy (ΔH) of all the machined samples were lower than unmachined sample ($\Delta H = 22.91$ j/gr). Accordingly, increase of cutting speed resulted in less affected transformation enthalpy. This scenario was observed independent of cutting tool material. In a similar manner, increase of cutting speed resulted in less affected transformation temperature hysteresis. Greater and deeper microhardness values were obtained at the lower cutting speed values. Accordingly, highest microhardness value of 535 HV occurred when machining with carbide cutting tool at the cutting speed of 25 m/min.

Conclusion: The evaluation of the results showed that surface milling of NiTi alloy using high cutting speed values is possible. The surface and functional integrity characteristics of this alloy, which composes the superiority of shape memory alloys, were highly cutting speed dependent. The conventional cutting speed values led to unfavorable results in this context. Employment of cutting speed values at the higher bound of the study spectrum resulted in least affected transformation enthalpy, transformation temperature and subsurface microhardness values.



NiTi şekil hafızalı alaşımların frezelenmesinde kesici takım ve kesme hızının yüzey bütünlüğü ve fonksiyonel özellikler üzerine etkisi

Eren Kaya*^{ID}, İrfan Kaya^{ID}

Eskişehir Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Eskişehir, 26555, Tepebaşı, Eskişehir, Türkiye

ÖNEÇIKANLAR

- İşlenebilirlik davranışları açısından NiTi'nin yüksek hızda frezelenmesi mümkündür
- NiTi'nin yüzey bütünlüğü ve işlevsel bütünlüğü büyük ölçüde kesme hızına bağlıdır
- Yüksek kesme hızlarının kullanılması, en az etkilenen dönüşüm sıcaklığı histerezisi ile sonuçlandı

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 30.03.2022

Kabul: 04.12.2022

DOI:

10.17341/gazimmfd.1095871

Anahtar Kelimeler:

NiTi,
Yüzey bütünlüğü,
Kesici takım malzemesi,
Yüksek hız,
fonksiyonel bütünlük

ÖZ

Nikel titanyum şekil hafızalı alaşımlar, fonksiyonel ve üstün mekanik özellikleri nedeni ile birçok uygulamada kullanılmaktadır. Bu alaşımların talaşlı imalat ile işlenebilirliğinin güç olduğu literatürde birçok araştırmada kabul görmüştür. Özellikle fonksiyonel bütünlük ve yüzey bütünlüğünün talaşlı imalattan negatif olarak etkileniyor oluşu havacılık ve biyomedikal gibi uygulamalarda potansiyel riskler meydana getirmektedir. Bu araştırmada oda sıcaklığında östenitik eşatomik NiTi alaşımı yüzey frezeleme ile çeşitli kesici takım malzemeleri kullanılarak işlenmiştir. Araştırmada 25 - 400 m/min arasındaki kesme hızları kullanılmış ve bu değişkenlerin yüzey bütünlüğü ile fonksiyonel bütünlük parametreleri üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Kesme hızının 100 m/min üzerine çıkması ile araştırılan kesici takımların genelinde daha düşük yüzey pürüzlülüğü elde edilmiştir. En düşük yüzey pürüzlülüğü değeri CBN kesici takım ile 400 m/min kesme hızı kullanıldığında elde edilmiştir. Faz dönüşüm entalpisi değerinin, işlenen tüm numunelerde işlenmemiş numuneye göre düştüğü, dönüşüm sıcaklığı histerezisinin ise arttığı sonucuna ulaşılmıştır. Buna göre, araştırılan tüm kesici takımlar için kesme hızı değeri artışının dönüşüm entalpisi ve dönüşüm sıcaklığı histerezisinde daha az etki yarattığı gözlemlenmiştir. Benzer olarak, kesme hızındaki artış ile yüzey altı sertleşmesinin daha az etkili olduğu gözlemlenmiştir. İşlenmemiş malzemenin mikrosertlik değeri 340 HV iken, karbür kesici takım ile 25 m/min kesme hızında gerçekleştirilen işlemede, kesilen yüzeyden 20 µm derinlikte bu değer %57 oranında arttığı gözlemlenmiştir.

The effect of cutting tool and cutting speed on the surface integrity and functional properties in milling of NiTi shape memory alloys

HIGHLIGHTS

- High speed milling of NiTi is possible regarding machinability behaviors
- Surface integrity and functional integrity of NiTi is highly cutting speed dependent
- Use of high cutting speeds resulted in least affected transformation temperature hysteresis

Article Info

Research Article

Received: 30.03.2022

Accepted: 04.12.2022

DOI:

10.17341/gazimmfd.1095871

Keywords:

NiTi,
Surface integrity,
Cutting tool material,
High speed,
Functional integrity

ABSTRACT

Nickel titanium shape memory alloys are used in many applications owing to their functional and superior mechanical properties. It is widely accepted in the literature that machining of these alloys is quite challenging. Especially the negative effects of machining on the functional and surface integrity yield potential risks in applications like aerospace and biomedical. In this research, room-temperature-austenitic equiatomic NiTi alloy was surface milled using different cutting tool materials. Cutting speed values between 25 and 400 m/min were employed and effects of these variables on the surface integrity and functional integrity were evaluated. When the cutting speed value was increased over 100 m/min, lesser surface roughness value was observed in most of the cutting tools. The lowest surface quality was achieved with CBN cutting tool at the cutting speed of 400 m/min. The results revealed that in all the machined samples, phase transformation enthalpy decreased and the phase transformation temperature hysteresis increased compared to the unmachined sample. Accordingly, it was observed that increase of cutting speed resulted in a less effect on transformation enthalpy and hysteresis for all the investigated cutting tool materials. Likewise, it is seen that less subsurface hardening effect was present when the cutting speed was increased. Knowing that as-received material microhardness value is 340 HV, machining with carbide cutting tool at the cutting speed of 25 m/min yielded an increase of 57% on this value at the depth of 20 µm below the cutting surface.

1. Giriş (Introduction)

Şekil hafızalı alaşımlar (ŞHA) ısı veya mekanik uyarılar sayesinde orijinal şekil ve boyutunu geri kazanabilen aktif malzemelerdir [1]. Konvansiyonel metallere farklı olarak sahip oldukları üstün fonksiyonel özellikleri ile son yıllarda endüstride kullanım alanları oldukça yaygınlaşmıştır. Şekil hafızalı alaşımlar arasında NiTi alaşımlar göstermiş oldukları yüksek süperelastisite, şekil hafıza ve biyo-uyumluluk gibi özellikleri ile havacılık ve uzay, biyomedikal, otomobil, robotik, elektronik, enerji ve inşaat sektörleri gibi birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır [2-5].

NiTi ŞHA'lardan imal edilen parçaların kullanım alanları dikkate alındığında, boyut ve şekil olarak hassas olması gerekmektedir. Bu parçaların imalatı için çeşitli imalat yöntemleri kullanılıyor olsa da yüksek boyutsal doğruluk kabiliyetleri nedeniyle en uygun yöntem talaşlı imalattır. Ancak bu alaşımın talaşlı imalatında, malzemenin fonksiyonel özellikleri ve onu özel kılan benzersiz gerilim-gerinim davranışlarından kaynaklı aşırı takım aşınması, talaş kontrolündeki zorluk ve yüksek kesme kuvvetleri ile yüksek kesme enerjisi gibi sorunlar ile karşılaşılımıştır [6].

Fonksiyonel özellikleri için tercih edilen NiTi ŞHA parçaların imalatında dikkat edilmesi gereken bir diğer konu ise imalat yönteminin parçanın fonksiyonel özellikleri üzerinde meydana getirdiği etkilerdir. Geleneksel işlenebilirlik ölçütleri içerisine dâhil edilmeyen, fonksiyonel bütünlük özellikleri imalat yönteminden negatif yönde etkilenmektedir. Bu durumun neticesinde, imalat sonrası final parçanın istenilen fonksiyonel özellikleri sergilememesi durumu ile karşılaşılabılır. Kesme bölgesindeki artan sıcaklık ve yüksek gerilim değerleri NiTi alaşımının mikro-yapısında kalıcı değişikliklere neden olmaktadır. Faz dönüşüm sıcaklıkları çok düşük olan NiTi alaşımının frezelenmesi esnasında oluşan faz dönüşümleri alaşımın yüzey ve yüzey altı bölgesinde değişikliklere neden olmakta ve malzemenin sönümlenme, şekil hafıza ve süperelastisite gibi üstün fonksiyonel özelliklerini olumsuz etkileyebilmektedir.

Talaşlı imalat yöntemlerinden biri olan frezeleme işlemi otomotiv, uçak ve makine endüstrisinde oldukça yaygın kullanılmaktadır [7-9]. Huang, östenitik Ni_{50.6}Ti_{49.4} (%at.) alaşımının frezelenmesinde kesme hızının, ilerleme hızının ve kesme derinliğinin işlenmiş yüzey özellikleri ve takım aşınması üzerindeki etkilerini incelemiştir [10]. Kesme hızındaki artışın daha iyi yüzey kalitesi ve daha az işleme sertleşmesine neden olduğu sonucu rapor edilmiştir. Bir başka çalışmada, Guo vd. (Ti,Al) N/ TiN kaplamalı karbür kesici takımlar kullanılarak frezeleme ile işlenmiş Ni_{50.8}Ti_{49.2} (%at.) alaşımının yüzey bütünlüğünü incelemiştir [11]. İşlenmiş NiTi alaşımının mikro yapısı incelendiğinde kalıcı östenit fazının olduğu ve işlemeden etkilenmiş yüzey altı katmanı görülmüştür. Benzer sonuçlara farklı çalışmalarda da rastlanmıştır [12-14]. Östenit fazı yüksek akma gerilimine sahipken, martenzit fazı nispeten yumuşak olup düşük akma gerilimi göstermektedir [15]. Martenzit fazında alaşımın talaşlı imalat ile işlenmesi yüksek seviyede işleme sertleşmesine neden olmaktadır. Bunun sonucunda istenmeyen yüzey altı hasarı oluşmakta olup parçanın yorulma ömrü kısalmaktadır. Genel olarak araştırmacılar, kesme hızındaki artış sayesinde işleme sertleşmesinde azalma sağlanabileceği sonucunu raporlamışlardır [16-18]. Talaşlı imalat işleminin iş parçasını çeşitli yöntemler ile martenzit fazında tutarak gerçekleştirildiği farklı çalışmalarda, yüksek derecede işleme sertleşmesi oluşumu raporlanmıştır [15, 19].

NiTi şekil hafızalı alaşımların faz dönüşümü entalpisi, faz dönüşümüne uğrayan malzemenin hacimsel ölçüsü olarak da değerlendirilebilir [20, 21]. Ortin ve Planes, martenzitik dönüşüm enerjisinin kimyasal entalpi, faz dönüşümü sırasında oluşan elastik

gerinim enerjisi ve sürtünme enerjisinden oluştuğunu raporlamışlardır [22]. Düşük hızlarda talaşlı imalat ile işlenmiş parçaların içyapıdaki sürtünme kaybindan dolayı dönüşüm entalpisinde büyük bir azalma olduğu ve buna bağlı olarak dönüşen malzeme miktarında azalma olduğu tespit edilmiştir. [23, 24]. NiTi ŞHA'ların fonksiyonel özelliklerinin esas olarak katı hal faz dönüşümüne bağlı olduğu değerlendirildiğinde, düşük hızlarda işleminin ya da kriyojenik soğutmanın NiTi parçaların uzun süreli kullanımını olumsuz yönde etkileyeceği görülmektedir. Bunun yanında dönüşüm entalpisindeki azalma ve faz dönüşüm sıcaklığı kayması ile fonksiyonel özelliklerde bozulma gözlemlenebilir.

Literatürde, NiTi alaşımların işlenebilirliği üzerine oldukça kısıtlı sayıda çalışma mevcuttur. Bu alaşımların işlenebilirlik davranışlarının anlaşılması için daha kapsamlı çalışmaların yapılması gerekmektedir. Özellikle farklı kesici takım malzemeleri ve yüksek kesme hızları kullanımının etkilerine dair yeterli deneysel bilgi olmadığı gözlemlenmiştir. Gerçekleştirilen çalışmada; NiTi alaşımı frezeleme işleminde dört farklı kesici takım malzemesi kullanılarak, kesme hızlarındaki değişime bağlı yüzey bütünlüğü ve fonksiyonel özellikler üzerine detaylı bir araştırma yapılmıştır.

2. Deneysel Metot (Experimental Method)

Araştırmada, *Baoji Seabird Metal Material Co. Ltd.* firmasından temin edilen 50 at.% Ni içeren eş atomik NiTi alaşımı kullanılmıştır. Frezeleme işlemi için 40 mm x 20 mm x 150 mm ölçülerinde NiTi numune temin edilmiştir. Alaşım tedarikçi firma tarafından vakum ark ergitme döküm ve ardından sıcak haddeleme yöntemleri ile üretilmiştir.

Frezeleme işlemlerinde LER VQ 110 marka CNC kontrollü, 4 eksenli dik işleme tezgâhı değiştirilebilir uçlu kesici takım ile birlikte kullanılmıştır (Şekil 1). Soğutma sıvısı kullanılmamış olup kuru kesim şartlarında deneyler gerçekleştirilmiştir. Tüm deneylerde yüzey frezeleme yöntemi kullanılmıştır.



Şekil 1. CNC kontrollü dik işleme tezgâhı (CNC machining center)

Tüm takım konfigürasyonları için üç ağızlı, TPKN ISO kod geometrisinde kesici uca uygun tutucu (tutucu kesme çapı $\phi = 63$ mm) kullanılmıştır. Çalışmada *Kennametal* firması tarafından üretilen whisker seramik, CBN, çok katmanlı PVD kaplamalı tungsten karbür (WC-PVD) ve kaplamasız tungsten karbür (WC) kesici takımlar kullanılmıştır. WC-PVD kesici ucun bağlayıcı kobalt fazı kütlece %6'dır ve kaplama malzemeleri ise TiN ve TiAlN'dir. WC kesici ucun tane boyutu 1 μ m, bağlayıcı kobalt fazı ise kütlece %5,7'dir. Kesici takımlara ait bazı özellikler Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Kesici takımların özellikleri (Features of cutting tools)

Kesici Takım	Kesici uç ISO kodu	Kalite
Whisker	TPGN 220412	KY 4300
CBN	TPGN 220408	KB 1630
WC -PVD	TPGN 220408	KCU 10
WC	TPGN 220408	K 68

Kesme parametreleri olarak tüm freze işlemlerinde sabit 0,05 mm/diş ilerleme (f_z), 0,2 mm eksenel (a_p) ve 20 mm radyal kesme derinliği (a_e) seçilmiş olup kesme hızları geleneksel (düşük) (25-50-75 m/min) ve yüksek (100-200-300-400 m/min) kesme hızları olarak iki grup altında incelenmiştir.

Yüzey pürüzlülüğü ölçümleri TESA marka Rugosurf 20 model yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı ile her bir deney koşulu için kesici takımın kestiği ilk yüzey üzerinden gerçekleştirilmiştir. Takım aşımının ölçülmesi için kesime ara verildiğinde (150 mm uzunluğundaki yüzey frezelemenin ardından) yüzey pürüzlülük cihazı ile yüzey üzerinde farklı yerlerden 5 adet ölçüm alınmıştır. Bu beş ölçümün ortalaması, yüzey pürüzlülüğü değeri olarak kabul edilmiştir.

Hem işlenmemiş malzemenin hem de her bir deney koşulu için işlenmiş numunenin, faz dönüşüm sıcaklıkları, entalpileri ve histerezisleri 10°C/min ısıtma/soğutma hızı ile TA Instruments DSC-25 model diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC) cihazı ile tespit edilmiştir.

Mikroyapı deneyleri için numune hazırlama sürecinde %3.2 HF + %14.6 HNO₃ + %82.2 H₂O dağılayıcı çözelti kullanılmıştır. Mikroyapı karakterizasyonu için Nikon marka optik mikroskop kullanılmıştır.

Talaşlı kaldırma işlemi sonrasında elde edilen işlenmiş numunelerin sertlik değerlerinin ölçümü için Struers-Duramin 4 model mikrosertlik cihazı kullanılmıştır. Mikrosertlik ölçümleri, Vickers sertlik (HV) ölçme yöntemiyle 100 gr yük altında 10 s indentasyon süresi ile gerçekleştirilmiştir. Mikrosertlik ölçümleri, işlenmiş yüzeyin 20 µm altından başlayarak, 20 µm aralıklarla işleme

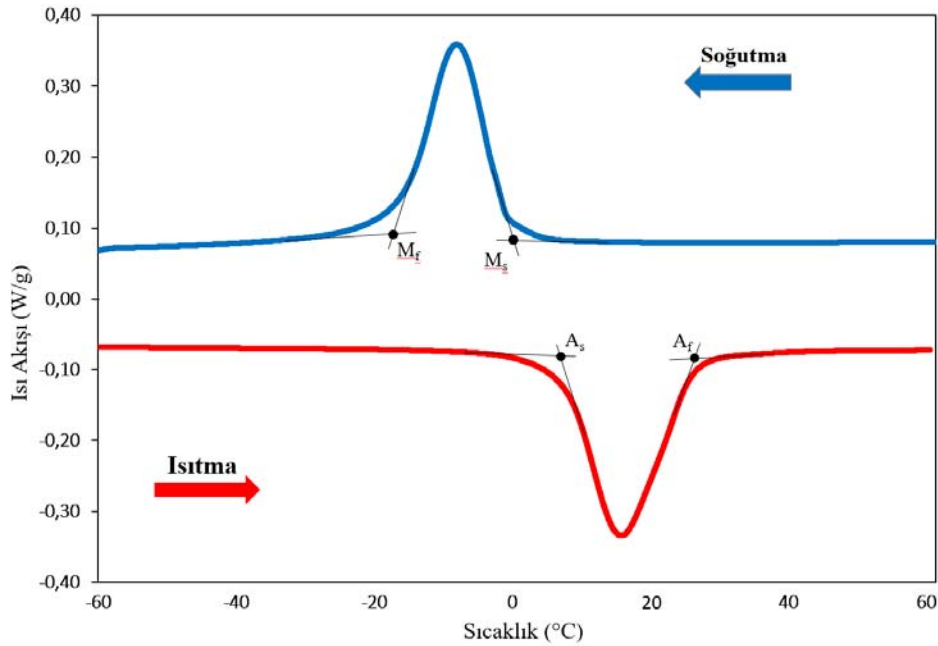
yüzeyinden uzaklaşacak şekilde 200 µm derinliğe kadar alınmıştır. Her bir derinlik için toplamda 5 adet ölçüm yapılmış ve bunların ortalaması o derinlik için mikrosertlik değeri olarak kabul edilmiştir.

3. Sonuçlar ve Tartışmalar (Results and Discussions)

Şekil 2'de işlenmemiş NiTi alaşımın faz dönüşüm sıcaklıklarını gösteren DSC grafiği verilmektedir. Östenit başlangıç (A_s) sıcaklığı 7°C, östenit bitiş (A_f) sıcaklığı 22°C, martenzit başlangıç (M_s) sıcaklığı -1°C ve martenzit bitiş (M_f) sıcaklığı -19°C olarak ölçülmüştür. Bu ölçüm sonuçlarına bakıldığında, alaşımın oda sıcaklığında östenit bir yapıda olduğu anlaşılmaktadır. Ayrıca östenit fazından martenzit fazına dönüş esnasında tespit edilen endotermik entalpi 25,3 j/g iken tersine faz dönüşümü esnasında 19,6 j/g'lık bir egzotermik entalpi ölçülmüştür.

Şekil 3'de çalışmada kullanılan dört farklı kesici takım için kesme hızının yüzey pürüzlülüğü üzerine etkisini gösteren grafik verilmiştir. Kesme hızının artmasıyla WC, CBN ve whisker seramik kesici takımlar ile işlenen parçaların yüzey pürüzlülük değerlerinde azalma olduğu görülmektedir. Literatürde kesme hızındaki artışın yüzey kalitesi üzerindeki olumlu etkisini gösteren benzer sonuçlar mevcuttur [25-27]. Bu durum kesme hızındaki artışın meydana getirdiği kesme kuvvetlerindeki azalma ile açıklanabilir. Yine bazı çalışmalarda, kesme hızındaki artışın yığıntı talaş oluşumunun azalmasına neden olduğu ve bunun sonucu olarak kesme hızındaki artışın yüzey pürüzlülüğüne olumlu yönde etki ettiği raporlanmıştır [28, 29].

En iyi yüzey kalitesi CBN kesici takım ile 400 m/min kesme hızında $R_a = 0,263 \mu\text{m}$ olarak ölçülmüş olup, en yüksek yüzey pürüzlülük değerleri ise WC-PVD kesici takım ile işlenmiş yüzeylerde yine 400 m/min kesme hızında $R_a = 0,661 \mu\text{m}$ olarak tespit edilmiştir. WC kesici takım için kesme hızındaki artışın yüzey pürüzlülük değerlerinde azalmaya neden olduğu görülürken, WC-PVD kesici takımında bu eğilim düşük kesme hızlarında (75 m/min kesme hızına kadar) görülmektedir. Bu kesici takım ile işlenmiş numune için 75 m/min kesme hızından sonra yüzey pürüzlülük değerinin aniden arttığı görülmüştür. Bu artış kesici kenar bölgesindeki parçacık



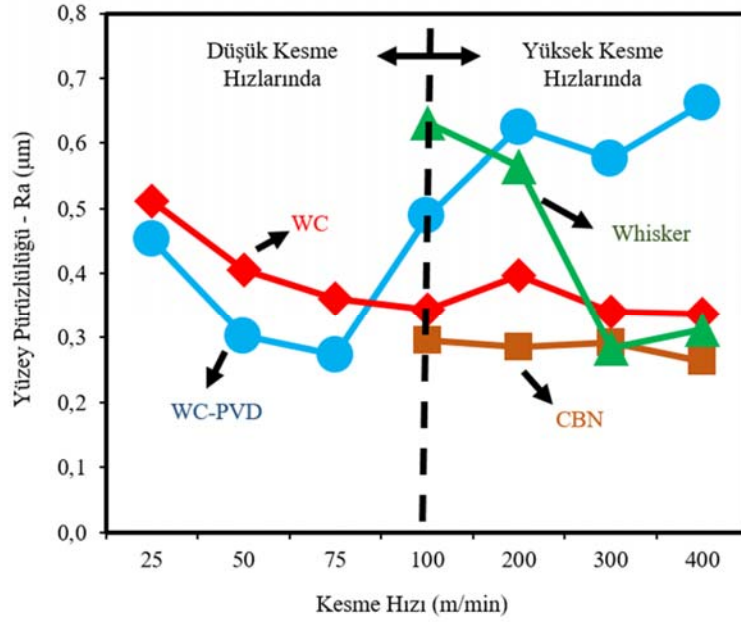
Şekil 2. İşlenmemiş NiTi alaşım için faz dönüşüm sıcaklıklarını gösteren DSC grafiği (DSC plot showing phase transformation temperatures for unmachined NiTi alloy)

kopması aşınması ile yüksek sertlikteki kaplamanın dökülmesi ve dökülen bu aşındırıcı partiküllerin kesilen yüzey üzerinde kayarken aşınmaya ve yüzey kalitesinin bozulmasına yol açması ile izah edilebilir. Şekil 4'te WC-PVD kesim ile $V_c = 50, 75, 100$ ve 200 m/min kesme hızlarında, ilk 150 mm uzunluğundaki frezelemenin ardından elde edilen talaş yüzeyi aşınması görüntüleri sunulmuştur. Şekil 4c'de görüldüğü üzere kesme hızı 100 m/min değerine arttırıldığında kesici kenarda parçacık kopması aşınması başlamıştır. Kesme hızı 200 m/min değerine arttırıldığında ise kaplama dökülmesi ile beraber kesici kenarda plastik deformasyon gözlemlenmiştir.

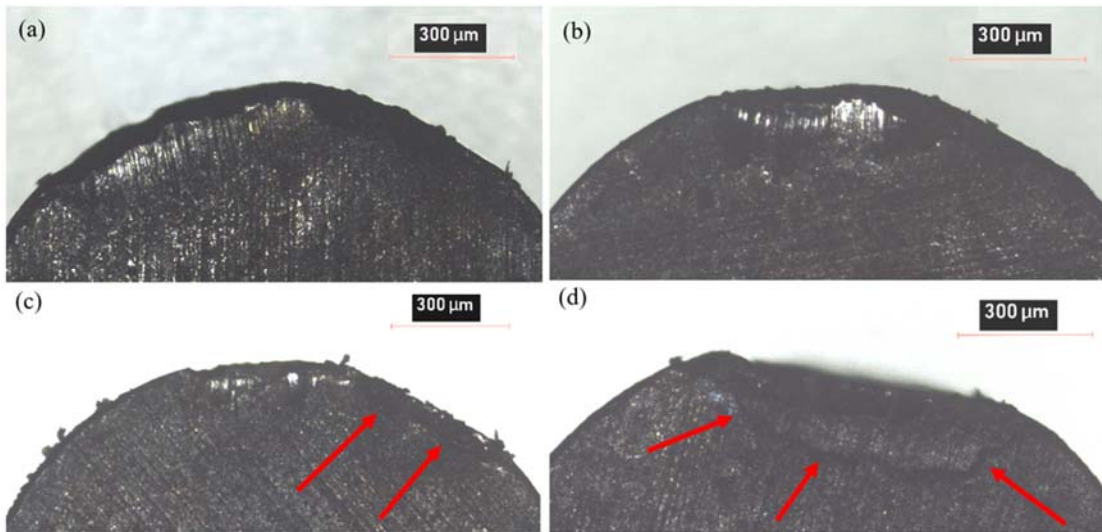
Whisker kesici takımında 100 m/min ve 200 m/min kesme hızlarında karşılaşılan yüksek yüzey pürüzlülük değerleri kesme hızının 300 m/min değerine yükseltilmesi ile ani belirgin bir düşüş göstermiştir.

Bu düşüşün takım aşınmasına bağlı olduğu düşünülmektedir. Şekil 5'te sırasıyla 100 m/min ve 300 m/min kesme hızlarında whisker kesici takımında ilk 30 mm uzunluğundaki frezelemenin ardından oluşan talaş yüzeyleri görüntüleri verilmiştir. 100 m/min kesme hızında (Şekil 5a) görülen çentik aşınması, 300 m/min kesme hızında (Şekil 5b) ortadan kalkmış ve parçacık dökülmesi azalmıştır.

Şekil 6a, Şekil 6b, Şekil 6c ve Şekil 6d sırasıyla WC, WC-PVD, whisker ve CBN kesici takımlar ile farklı kesme hızlarında yapılan işlemlerin sonucunda ortaya çıkan östenitik dönüşüm entalpileri (ΔH (A)) ve martenzitik dönüşüm entalpileri (ΔH (M)) verilmiştir. Kesme hızındaki artış ile birlikte faz dönüşüm entalpilerinde artış görüldüğü tespit edilmiştir. Düşük kesme hızlarında görülen düşük dönüşüm entalpisi bu hızlarda işleme esnasında oluşan yüksek kesme



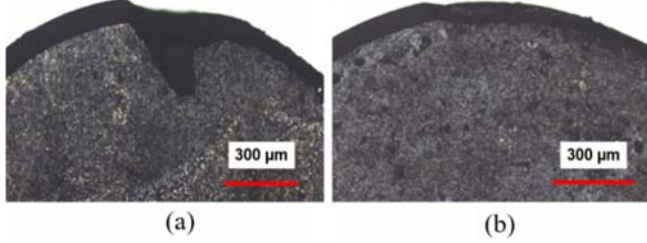
Şekil 3. Farklı kesici takımlar için kesme hızı ile yüzey pürüzlülüğü arasındaki ilişki (Relationship between cutting speed and surface roughness for different cutting tools)



Şekil 4. WC-PVD kesici takım için a) 50 m/min, b) 75 m/min, c) 100 m/min, d) 200 m/min kesme hızları ile frezelemenin ardından oluşan talaş yüzeyi aşınma görüntüleri.

(Rake wear images after milling with cutting speeds of a) 50 m/min, b) 75 m/min, c) 100 m/min, d) 200 m/min for WC-PVD cutting tool.)

gerilmeleri ile açıklanabilir. İşleme sırasında meydana gelen artık gerilmeler neticesinde NiTi iş parçasında kararlı martenzit yapı oluşmaktadır. Yine işleme esnasında açığa çıkan kesme sıcaklıkları da dönüşüm entalpilerini etkilemektedir. Kesme sıcaklıkları yüksek kesme hızlarında artmaktadır. Artan bu sıcaklık malzeme iç kusur ve gerilim kaynaklı martenzitlerin giderilmesine neden olmaktadır [30].



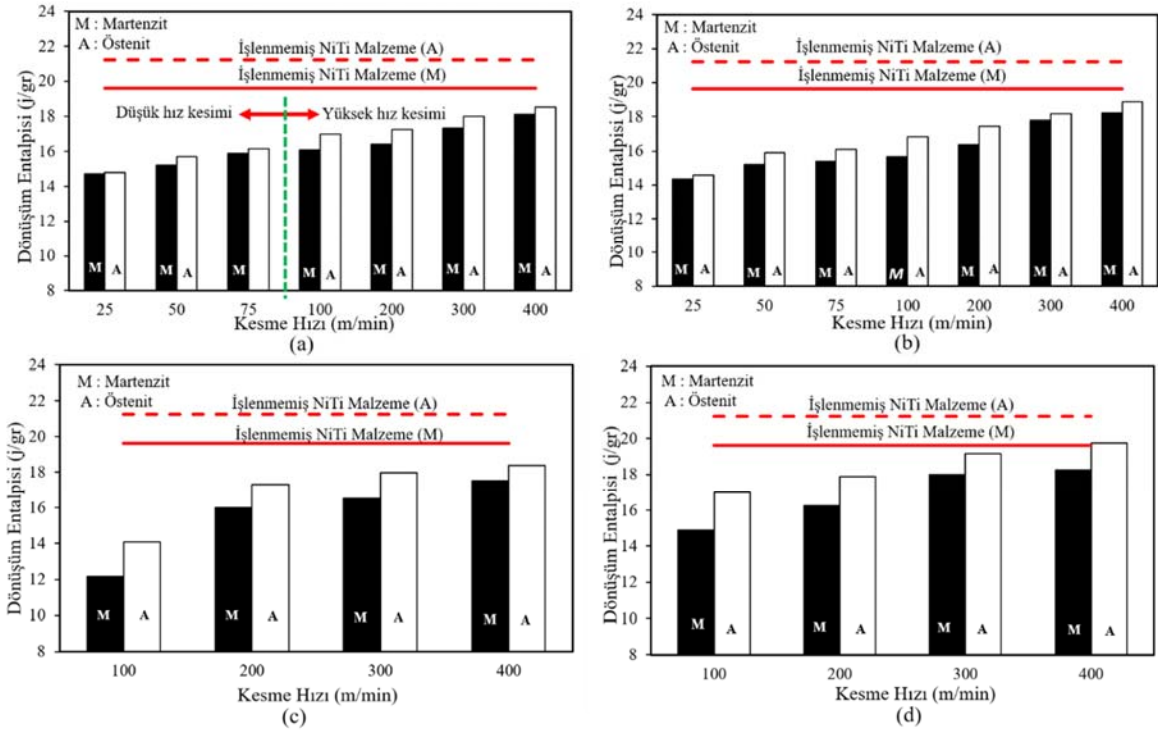
Şekil 5. Whisker kesici takım için a) 100 m/min, b) 300 m/min kesme hızları ile frezelemenin ardından oluşan talaş yüzeyi aşınma görüntüleri.
(Rake wear images after milling with cutting speeds of a) 100 m/min, b) 300 m/min for Whisker cutting tool.)

Faz dönüşümü sıcaklık histerezi, enerjinin sürtünme işi veya sıcaklık olarak dağıtılması nedeniyle oluşur. Deformasyon kaynaklı histerezis, malzemenin iç gerilmeler, sürtünmeler ve dislokasyonlar kaynaklı olarak, faz dönüşümünü geç başlatmasından kaynaklanmaktadır ve dolayısıyla dönüşüm histerezi ($A_f - M_s$) artmaktadır. Hamilton vd. NiTi ŞHA üzerine uygulanan soğuk işlem deformasyonundaki artışın, termal histerezis artışına neden olduğunu bildirmiştir [31]. Bu durum deformasyon kaynaklı olarak kararlı martenzit oluşması ve östenitik dönüşüm sıcaklıklarının ötelenmesinden dolayı meydana gelmektedir [32]. İç sürtünmeler ve

biriktirilen elastik gerinim enerjisi, östenitik dönüşüm başlangıcını bir miktar engellemektedir. Mahmud vd. deformasyon miktarındaki artış ile termal histerezisin artış gösterdiğini, deformasyon sıcaklığındaki artış ile de azalma gösterdiğini raporlamışlardır [30]. Termal histerezisin artmasının tersinebilir enerjideki azalmadan kaynaklandığı bildirilmiştir [33]. Özel bir uygulama gerekmedikçe termal histerezisteki artışın, malzemenin faz dönüşüm özelliklerini negatif yönde etkilediği söylenebilir.

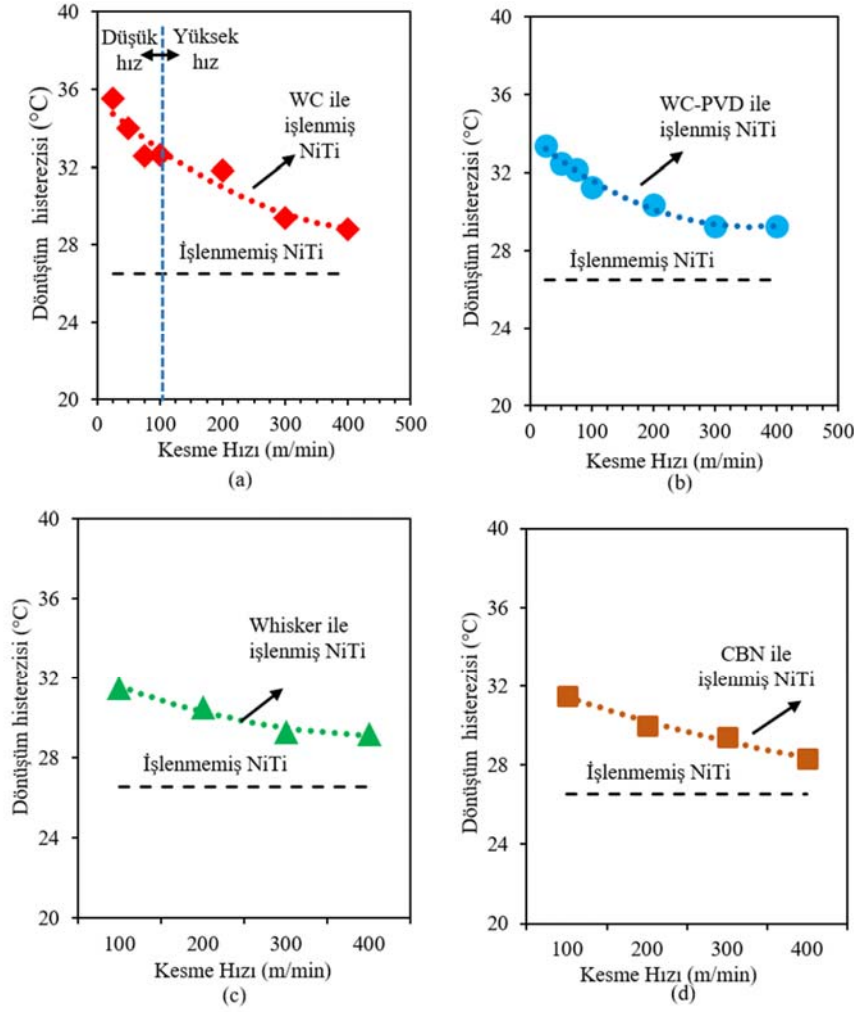
Şekil 7a, Şekil 7b, Şekil 7c ve Şekil 7d'de sırasıyla WC, WC-PVD, whisker ve CBN kesici takımlar için kesme hızı ve faz dönüşüm histerezi arasındaki ilişkiyi gösteren grafikler verilmiştir. Bütün kesici takımlarda, kesme hızlarındaki artış ile birlikte dönüşüm sıcaklığı histerezislerinde azalma görülmektedir. Yüksek kesme hızlarında kesme yükleri azalırken kesme sıcaklıkları artmaktadır. Azalan kesme yükleri sayesinde işleme esnasında oluşan deformasyon, dislokasyon ve içyapı kusurlarının azalması söz konusudur. Ayrıca kesme sıcaklıklarında meydana gelen artışlar işleme kaynaklı iç yapı kusur ve deformasyonların giderilmesine neden olmaktadır [17]. İşleme öncesi elde edilen dönüşüm sıcaklığı histerezi tüm koşullarda işlem görmüş malzemenin göstermiş olduğu dönüşüm sıcaklığı histerezisinden daha düşük olarak elde edilmiştir.

WC ve WC-PVD kesici takımlar için verilen grafikler düşük hızlarda ($V_c = 25, 50, 75$ m/min) frezeleme işlemi sonucu elde edilen dönüşüm sıcaklığı histerezislerini de göstermektedir (Şekil 7a-Şekil 7b). Dönüşüm sıcaklığı histerezislerinin kesme hızına göre değişimini gösteren grafiklerde, düşük kesme hızlarında yüksek kesme hızları bölgesinde görülen eğime göre daha dik bir eğim görülmektedir. Buradan düşük kesme hızlarındaki artışın dönüşüm histerezi üzerinde daha etkili olduğu sonucu çıkarılabilir. WC kesici takım kullanılarak 25 m/min kesme hızında işlenmiş alaşımın dönüşüm



Şekil 6. a) WC, b) WC-PVD, c) whisker ve d) CBN kesici takımlar ile farklı kesme hızlarında frezelemenin ardından elde edilen dönüşüm entalpileri.

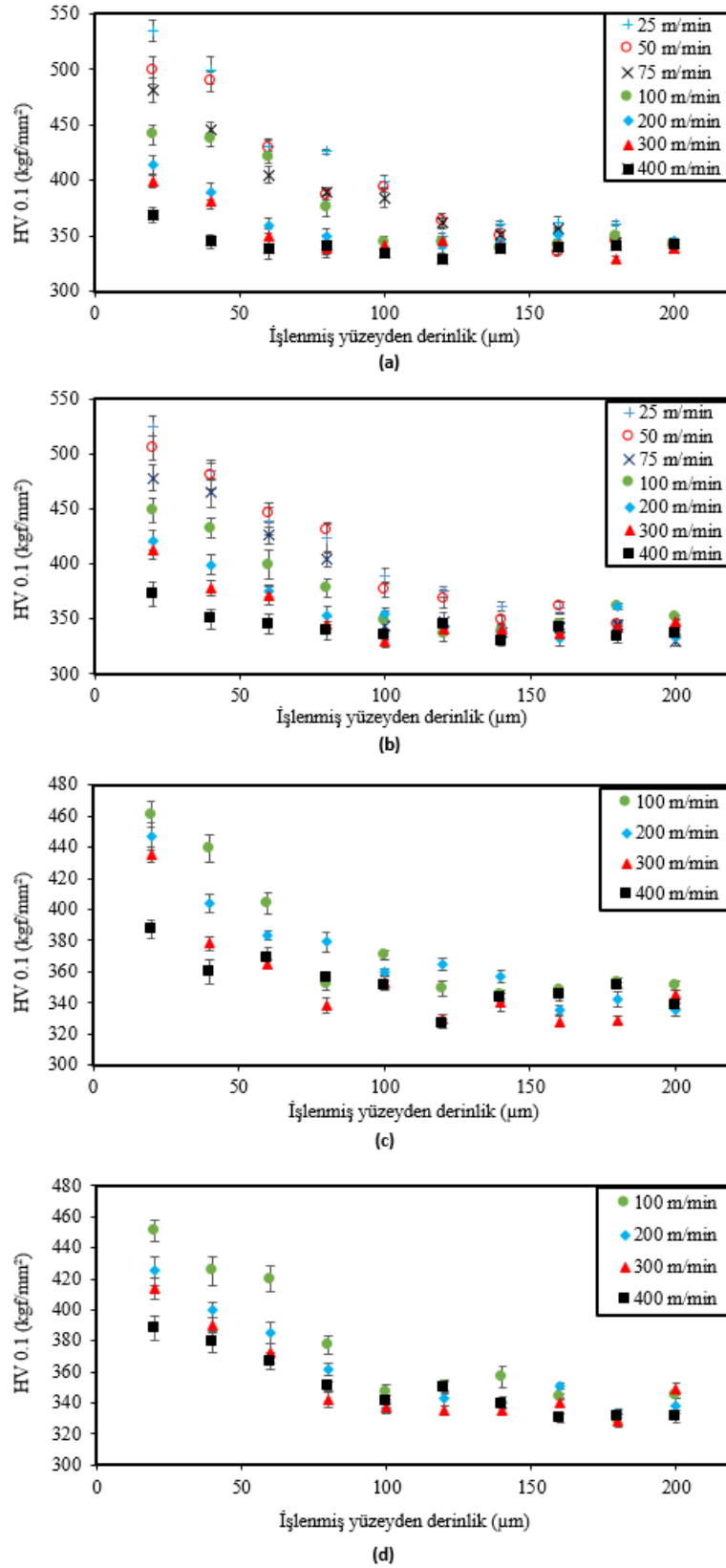
(Transformation enthalpies obtained after milling with a) WC, b) WC-PVD, c) whisker and d) CBN cutting tools at different cutting speeds.)



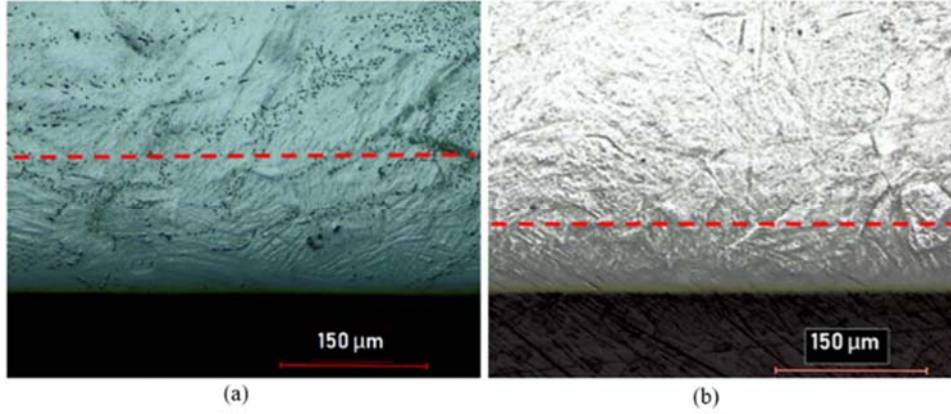
Şekil 7. a) WC, b) WC-PVD, c) whisker ve d) CBN kesici takımlar için kesme hızı ve faz dönüşüm histerezisi arasındaki ilişki (Relationship between cutting speed and phase transformation hysteresis for a) WC, b) WC-PVD, c) whisker and d) CBN cutting tools)

histerezisi 35,5°C iken 75 m/min kesme hızında bu dönüşüm histerezisi 32,6°C'dir. Yüksek kesme hızının başladığı 100 m/min kesme hızı ve üzerindeki kesme hızlarında histerezis değışim hızında azalma görülmektedir. WC kesici takım kullanılarak 100 m/min kesme hızında işlenmiş alaşımın dönüşüm histerezisi 31,3°C iken 400 m/min kesme hızında bu dönüşüm histerezisi 29,3°C'dir. Huang, NiTi alaşımların yüksek hızlarda frezelenmesini incelediği araştırmasında, kesme kuvvetlerinin $V_c = 75$ m/min kesme hızına kadar daha büyük bir hızla azaldığını raporlamıştır [10]. Düşük kesme hızlarındaki bu histerezis eğimi kesme kuvvetlerinin etkisi ile açıklanabilir. Şekil 8'de araştırılan kesici takımlar ile 0,05 mm/diş ilerleme değeri ile çeşitli kesme hızlarında işlenen NiTi alaşımında meydana gelen mikrosertlik değışimleri gösterilmektedir. Çalışmada kullanılan tüm kesici takımlar için kesme hızı ve yüzey altı mikrosertlik değeri arasında benzer davranış görülmüştür. İşlenmiş yüzeye yakın kısımlarda alaşımın mikrosertlik değeri yüksek olduğu, işlenmiş yüzeyden derinlik arttıkça bu değerin özellikle düşük hızlarda işleme maruz kalmış malzemelerde belirgin şekilde azaldığı görülmüştür. Örneğin WC kesici takım ile 100 m/min kesme hızında 20 µm derinlikte elde edilen mikrosertlik değeri 441 HV iken, 200 µm derinlikte elde edilen mikrosertlik değeri 343 HV olarak ölçülmüştür. Yine Şekil 8'de görüldüğü üzere yüzey altındaki mikrosertlik değeri kesme hızının artmasıyla azalmaktadır. En yüksek sertlik değeri WC kesici takım ile işlenmiş alaşım üzerinden 20 µm derinlikte ölçülen 535 HV değeri ile

25 m/min kesme hızında görülmüş olup işlenmemiş NiTi alaşımının mikrosertlik değeri oranla %57'lik bir artış olmuştur. 400 m/min kesme hızında aynı kesici takım ve aynı derinlikten alınan ölçüm sonucunda mikrosertlik değeri 369 HV'dir. Çalışmadaki en yüksek kesme hızı olan 400 m/min kesme hızında yüzey altı bölgede, işlenmemiş parçaya (340 HV) göre daha yüksek mikrosertlik değeri elde edilmiştir. Şekil 8'de işlenmiş yüzeyden 140 µm derinlikten sonra işleme sertleşmesinin etkilerinin kaybolduğu görülmektedir. Sertleşmiş bölgenin derinliği üzerinde kesme hızına oranla ilerleme değeri daha etkilidir [34]. Düşük kesme hızlarında, işlemeden etkilenmiş yüzey altı bölgesindeki sertliğin yüksek olması, işleme anında bu bölgede oluşan dislokasyon yoğunluğuna bağlı işleme sertleşmesine neden olan martenzit yapı ile açıklanabilir [6, 10, 35]. Kesme hızının artışı ile mikrosertlik değeri azalma kesme işlemi esnasında açığa çıkan ısı oluşumu ile açıklanabilir [36]. Yüksek kesme hızlarında iş parçasına aktarılan ısı azalırken düşük mikrosertlik değeri görülür [37]. Şekil 9'da CBN kesici takım kullanılarak frezelenmiş NiTi alaşımın mikroyapı görüntüleri verilmiştir. Mikroyapı görüntülerinden ölçülen kararlı martenzit kalınlıkları, sertleşme değeri ile uyumludur. Yüksek kesme hızı ile işlenen numune kararlı martenzit kalınlığının daha düşük olduğu görülmektedir. 100 m/min ve 400 m/min kesme hızlarında frezeleme işlemi sonucunda sırasıyla katman kalınlıkları 165 µm ve 68 µm olan yüzey altı bölgede martenzit oluşumu görülmüştür.



Şekil 8. a) WC, b) WC-PVD, c) whisker ve d) CBN kesici takımlar için çeşitli kesme hızlarında işlenen NiTi alaşımında mikrosertlik değişimleri (Microhardness changes in NiTi alloy processed at various cutting speeds for a) WC, b) WC-PVD, c) whisker and d) CBN cutting tools)



Şekil 9. CBN kesici takım ile a) 100 m/min kesme hızında ve b) 400 m/min kesme hızında frezeleme sonrasında yüzey altı bölgede kararlı martenzit oluşumu

(Stable martensite formation in the subsurface area after milling with a CBN cutting tool at a) 100 m/min cutting speed and b) 400 m/min cutting speed)

Araştırma kapsamında sabit 0,05 mm/diş ilerleme değeri kullanılmış olup, ilerleme değişiminin yüzey ve fonksiyonel bütünlük üzerine etkileri incelenmemiştir. Talaşlı imalat geometrik modeline göre, ilerleme değerinin artması neticesinde kesilmiş talaş kalınlığının artması, azalması neticesinde ise talaş kalınlığının azalması beklenmektedir. Buna göre artan ilerleme değeri ile daha büyük talaşlar kopartılacak ve yüzeyde taranan alan azalacaktır. Bu durumda yüzey pürüzlülüğünün azalması beklenmektedir. NiTi ŞHA'larda önceden yapılan frezeleme çalışmalarında ilerleme ve yüzey kalitesi arasında bu beklenen ilişkinin olduğu görülmektedir [10, 11, 38]. Sabit kesme hızında, talaş kalınlığının artması ile beraber, daha fazla miktarda malzeme kopartılacak ve dolayısıyla kesme kuvvetleri de artış gösterecektir. Kesme kuvvetlerindeki artışın ise daha fazla işleme sertleşmesine neden olması beklenmektedir. Huang, kesme ilerlemesi ile kesme kuvvetleri ve işlenmiş yüzey altı sertlik arasındaki ilişkide benzer durumu raporlamıştır [10]. Bu bilgiler ışığında, daha yüksek bir sabit ilerleme değeri için kesme hızı değişiminin, fonksiyonel ve yüzey bütünlüğü üzerinde benzer davranışlara yol açacağı düşünülmektedir. Bu konunun gelecek çalışmalarda araştırılması önerilmektedir.

4. Sonuçlar (Conclusions)

Bu çalışmada günümüzde birçok alanda kullanımı yaygınlaşan NiTi şekil hafızalı alaşımın frezelenmesi işleminde kesici takım ve kesme hızının yüzey pürüzlülüğü, mikrosertlik değişimi ve faz dönüşümü gibi iş parçası alaşımının yüzey bütünlüğü ve fonksiyonel özellikleri üzerine etkileri deneysel olarak araştırılmıştır. Bu kapsamda kaplamalı ve kaplamasız tungsten karbür kesici takımlar ile tarihsel süreci daha yeni olan yüksek sertlikteki whisker ve CBN kesici takımlar da kullanılmıştır. Literatürde araştırma parametreleri kapsamında sonuçları henüz bulunmayan yüksek kesme hızları deneysel olarak uygulanmıştır. Bunun yanında geleneksel hızlarda işleme de gerçekleştirilmiştir.

- İşleme sonrası yüzey kalitesinin, kesme hızından, kesici takım malzemesinden ve aktif faz durumundan etkilendiği görülmüştür.
- 100 m/min üzerindeki kesme hızlarında, kaplamalı karbür kesici takım dışında kalan diğer kesici takımlar ile daha iyi yüzey kalitesi elde edilmiştir. En iyi yüzey kalitesi CBN takımı ile 400 m/min kesme hızında $R_a = 0,263 \mu\text{m}$ değeri olarak elde edilirken, en kötü yüzey kalitesi ($R_a = 0,661 \mu\text{m}$) kaplamalı karbür takım ile aynı kesme hızında elde edilmiştir.
- İşlenmiş tüm numuneler için tespit edilen dönüşüm entalpi değerlerinin (ΔH), işlenmemiş numunenin dönüşüm entalpi değerinden daha düşük olduğu görülmüştür.

- Daha düşük kesme hızı değerlerinde daha büyük mikrosertlik değerleri elde edilmiştir. En yüksek mikrosertlik değeri olan 535 HV, 25 m/min kesme hızında karbür kesici takımla işleme yapıldığında meydana gelmiştir.
- Çalışma spektrumunun üst sınırında kesme hızı değerlerinin kullanılması, dönüşüm entalpis, dönüşüm sıcaklığı ve yüzey altı mikrosertlik değerlerinin en az etkilenmesiyle sonuçlanmıştır.
- Deneysel sonuçları NiTi alaşımının yüksek kesme hızı değerleri kullanılarak yüzey frezelemesinin mümkün olduğunu göstermiştir.

Kaynaklar (References)

1. Sreenivasulu, R., Industrial Digitalization with Four Dimensional (4D) Printing-Novel Technology: Brief Review on Developments, Challenges and Applications, Gazi University Journal of Science, 35 (2), 682-693, 2022.
2. Bil, C., Massey, K., Abdullah, E.J., Wing morphing control with shape memory alloy actuators, Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 24 (7), 879-898, 2013.
3. Safaei, K., Abedi, H., Nematollahi, M., et al., Additive Manufacturing of NiTi Shape Memory Alloy for Biomedical Applications: Review of the LPBF Process Ecosystem, JOM, 1-16, 2021.
4. Chaudhari, R., Vora, J.J., Parikh, D., A review on applications of nitinol shape memory alloy, in Recent Advances in Mechanical Infrastructure. Springer, 123-132, 2021
5. Yıldız, K., Effect of Heat Treatment on the Structural Properties and Martensitic Transformation of Ni-26.5 at% Ta High Temperature Shape Memory Alloy, Gazi University Journal of Science, 33 (2), 541-546, 2020.
6. Weinert, K., Petzoldt, V., Machining of NiTi based shape memory alloys, Materials Science and Engineering: A, 378 (1-2), 180-184, 2004.
7. Araujo, A.C., Landon, Y., Lagarrigue, P., Smart drilling for Aerospace Industry: state of art in research and education, Procedia CIRP, 99 387-391, 2021.
8. Ginting, A., 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 (7-8), 758-768, 2006.
9. de Souza, A.F., Coelho, R.T., Experimental investigation of feed rate limitations on high speed milling aimed at industrial applications, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 32 (11-12), 1104-1114, 2007.
10. Huang, H., A study of high-speed milling characteristics of nitinol, Materials and Manufacturing Processes, 19 (2), 159-175, 2004.
11. Guo, Y., Klink, A., Fu, C., Snyder, J., Machinability and surface integrity of Nitinol shape memory alloy, CIRP Annals-Manufacturing Technology, 62 (1), 83-86, 2013.
12. Umbrello, D., Filice, L., Improving surface integrity in orthogonal machining of hardened AISI 52100 steel by modeling white and dark layers formation, CIRP annals, 58 (1), 73-76, 2009.

13. Piquard, R., d'Acunto, A., Laheurte, P., Dudzinski, D., Micro-end milling of NiTi biomedical alloys, burr formation and phase transformation, *Precision Engineering*, 38 (2), 356-364, 2014.
14. Kaynak, Y., Huang, B., Karaca, H., Jawahir, I., Surface characteristics of machined NiTi shape memory alloy: the effects of cryogenic cooling and preheating conditions, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 26 (7), 3597-3606, 2017.
15. Zailani, Z.A., Mativenga, P.T., Effects of Chilled Air on Machinability of NiTi Shape Memory Alloy, *Procedia CIRP*, 45, 207-210, 2016.
16. Kaya, E., Kaya, İ., A review on machining of NiTi shape memory alloys: the process and post process perspective, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 100 (5), 2045-2087, 2019.
17. Kaynak, Y., Karaca, H., Jawahir, I., Cutting speed dependent microstructure and transformation behavior of NiTi alloy in dry and cryogenic machining, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 24 (1), 452-460, 2015.
18. Weinert, K., Petzoldt, V., Kötter, D., Turning and drilling of NiTi shape memory alloys, *CIRP Annals*, 53 (1), 65-68, 2004.
19. Kaynak, Y., Tobe, H., Noebe, R., Karaca, H., Jawahir, I., The effects of machining on the microstructure and transformation behavior of NiTi Alloy, *Scripta Materialia*, 74 60-63, 2014.
20. Tang, W., Thermodynamic study of the low-temperature phase B19' and the martensitic transformation in near-equiatomic Ti-Ni shape memory alloys, *Metallurgical and Materials Transactions A*, 28 (3), 537-544, 1997.
21. Yang, S.Y., Dui, G.S., Temperature analysis of one-dimensional NiTi shape memory alloys under different loading rates and boundary conditions, *International Journal of Solids and Structures*, 50 (20), 3254-3265, 2013.
22. Ortin, J., Planes, A., Thermodynamic analysis of thermal measurements in thermoelastic martensitic transformations, *Acta metallurgica*, 36 (8), 1873-1889, 1988.
23. McCormick, P.G., Liu, Y., Thermodynamic analysis of the martensitic transformation in NiTi—II. Effect of transformation cycling, *Acta Metallurgica et Materialia*, 42 (7), 2407-2413, 1994.
24. Pelton, A.R., Huang, G.H., Moine, P., Sinclair, R., Effects of thermal cycling on microstructure and properties in Nitinol, *Materials Science and Engineering: A*, 532, 130-138, 2012.
25. Boothroyd, G., *Fundamentals of metal machining and machine tools*. Vol. 28, Crc Press, 1988.
26. Shaw, M.C., Cookson, J., *Metal cutting principles*, Oxford university press New York, 2, 2005.
27. Kaçal, A., Yıldırım, F., Determining the effects of cbn cutting insert's cutting performance on surface roughness and tool wear at turning of PMD 23 steel, *Gazi University Journal of Science*, 31 (1), 2016.
28. Ciftci, I., Machining of austenitic stainless steels using CVD multi-layer coated cemented carbide tools, *Tribology international*, 39 (6), 565-569, 2006.
29. Munoz-Escalona, P., Cassier, Z., Influence of the critical cutting speed on the surface finish of turned steel, *Wear*, 218 (1), 103-109, 1998.
30. Mahmud, A.S., Yang, H., Tee, S., Rio, G., Liu, Y., Effect of annealing on deformation-induced martensite stabilisation of NiTi, *Intermetallics*, 16 (2), 209-214, 2008.
31. Hamilton, R.F., Sehitoglu, H., Chumlyakov, Y., Maier, H.J., Stress dependence of the hysteresis in single crystal NiTi alloys, *Acta Materialia*, 52 (11), 3383-3402, 2004.
32. Karaman, I., Karaca, H.E., Luo, Z., Maier, H., The effect of severe marforming on shape memory characteristics of a Ti-rich NiTi alloy processed using equal channel angular extrusion, *Metallurgical and Materials Transactions A*, 34 (11), 2527-2539, 2003.
33. Ramaiah, K., Saikrishna, C., Bhaumik, S., Ni_{24.7}Ti_{50.3}Pd_{25.0} high temperature shape memory alloy with narrow thermal hysteresis and high thermal stability, *Materials & Design (1980-2015)*, 56 78-83, 2014.
34. Kaya, E., Akyüz, B., Effects of cutting parameters on machinability characteristics of Ni-based superalloys: a review, *Open Engineering*, 7 (1), 330-342, 2017.
35. Wu, M.H., *Fabrication of nitinol materials and components*, Materials Science Forum, Trans Tech Publ, 2002.
36. Gürbüz, H., Şeker, U., Kafkas, F., Effects of cutting tool forms on the surface integrity in turning of AISI 316L stainless steel, *Gazi University Journal of Science*, 35 (1), 225-240, 2020.
37. Sandvik Coromant, *Modern metal cutting: a practical handbook*, English Edition, Sweden, I-III, 35-120, 1994.
38. Altas, E., Gokkaya, H., Karatas, M.A., Ozkan, D., Analysis of Surface Roughness and Flank Wear Using the Taguchi Method in Milling of NiTi Shape Memory Alloy with Uncoated Tools, *Coatings*, 10 (12), 1259, 2020.