MARMARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ŞEKİL HAFIZALI NiTi ALAŞIMIN TALAŞLI İMALATI SONRASI YÜZEY BÜTÜNLÜĞÜ KARAKTERİSTİKLERİNİN İNCELENMESİ

ÖZHAN KITAY

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Makine Mühendisliği
Anabilim Dalı

DANIŞMAN
Doç. Dr. Yusuf KAYNAK

İSTANBUL, 2018

MARMARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ŞEKİL HAFIZALI NiTi ALAŞIMIN TALAŞLI İMALATI SONRASI YÜZEY BÜTÜNLÜĞÜ KARAKTERİSTİKLERİNİN İNCELENMESİ

ÖZHAN KITAY

(523216059)

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Makine Mühendisliği
Anabilim Dalı

DANIŞMAN
Doç. Dr. Yusuf KAYNAK

İSTANBUL, 2018

MARMARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Öğrencisi Özhan KITAY'ın "Şekil Hafızalı NiTi Alaşımın Talaşlı İmalatı Sonrası Yüzey Bütünlüğü Karakteristiklerinin İncelenmesi" başlıklı tez çalışması, 06/11/2018 tarihinde savunulmuş ve jüri üyeleri tarafından başarılı bulunmuştur.

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. Yusuf KAYNAK (Danışman)
Marmara Üniversitesi .....

Prof. Dr. Erhan ALTAN (Üye)
Yıldız Teknik Üniversitesi .....

Prof. Dr. M. Hüsnü DİRİKOLU (Üye)
İstanbul Üniversitesi .....

ONAY

Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 05./12./2018 tarih ve 2018/29.-02.. sayılı kararı ile Özhan KITAY'ın Makine Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans derecesi alması onanmıştır.

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü
Prof. Dr. Bülent EKİCİ

ÖNSÖZ

En başta bu tezin ortaya çıkması olmak üzere, İleri İmalat Teknolojileri Laboratuvarı bünyesinde lisansüstü eğitimim boyunca TÜBİTAK ve BAPKO projelerinde çalışma fırsatı vererek, proje alışkanlığı kazanma ve tecrübelerinden yararlanma imkânı verdiği için tez danışmanım Sayın Doç. Dr. Yusuf KAYNAK'a çok teşekkür ediyorum.

Lisansüstü tez çalışmalarım süresince İleri İmalat Teknolojileri Laboratuvarında beraber çalıştığım, her konuda desteğini esirgemeyen değerli arkadaşım Emre TAŞCIOĞLU'na çok teşekkür ediyorum.

Yüksek lisansa başlamam hususunda beni teşvik eden ve eğitimim süresince her zaman desteklerini hissettiren değerli Babam, Annem ve Kardeşlerime en içten dileklerimle teşekkür ediyorum.

Bu tez çalışması Marmara Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi (BAPKO) tarafından FEN-C-YLP-150218-0061 Proje Numarası ile desteklenmiştir. Desteğinden dolayı Marmara Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi'ne teşekkür ederim.

Kasım, 2018 **Özhan KITAY**

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ i
İÇİNDEKİLER ii
ÖZET iv
ABSTRACT v
SEMBOLLER vi
KISALTMALAR vii
ŞEKİL LİSTESİ viii
1. GİRİŞ 1
2. DENEYSEL ÇALIŞMA VE DÜZENEKLER 8
2.1 Deneysel Çalışmada Kullanılan İş Malzemesi 8
2.2 CNC Torna Tezgahı, Takım Tutucular ve Kesici Takım 11
2.3 Soğutucu ve Yağlayıcılar 13
2.4 Kesme Parametleri 14
2.5 Kesme Kuvvetleri Ölçümü 15
2.6 Kesme Sıcaklıkları Ölçümü 15
2.7 Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümü 16
2.8 Yüzey Bütünlüğü Analiz Çalışmaları Kapsamında Yapılan Hazırlıklar 16
2.9 Sertlik Ölçümü 19
2.10 Mikroyapı Görüntüleme 20
2.11 XRD Faz Analizi Ölçümü 21
3. ÖN ÇALIŞMA SONUÇLARI 22
4. ASIL DENEYLERİN BULGULARI VE TARTIŞMA 23
4.1 Kesme Kuvvetleri 23
4.2 Kesme Sıcaklığı 28
4.3 Serbest Yüzey Aşınması 30
4.4 Burun Aşınması 34
4.5 Takım-Talaş Temas Alanı 38
4.6 Yüzey Topoğrafisi 42
4.7 Yüzey Pürüzlülüğü 45
4.8 Talaş Formu ve Kırılabilirliği 48
4.9 Mikroyapı Analizi 51

4.10 Mikrosertlik Analizi 57
4.11 XRD Faz Analizi 61
5. SONUÇLAR 67

ÖZET

ŞEKİL HAFIZALI NiTi ALAŞIMIN TALAŞLI İMALATI SONRASI YÜZEY BÜTÜNLÜĞÜ KARAKTERİSTİKLERİNİN İNCELENMESİ

Havacılık, uzay ve biyomedikal sektöründe kullanılan şekil hafızalı NiTi alaşımın(SMA) kullanım alanı gittikçe yaygınlaşmaktadır. Özellikle sahip olduğu süperelastiklik ve kuvvet ve sıcaklığın etkisiyle deforme edildiğinde ve bu etkiler ortadan kalktığında ilk halini geri dönebilmesine imkân tanıyan şekil hafıza özelliğinde dolayı implant yapımında kullanılmaktadır. Faz dönüşüm sıcaklıklarının insan vücut ısısına yakın olması, kullanımını yaygınlaştıran bir diğer etkendir.

Diğer mühendislik malzemelerinden farklı olarak sahip olduğu bu özelliklerinin yanında, NiTi alaşımın zayıf noktalarından biri işlenmesinin zorluğudur. İşlenmesi zor malzemeler arasında yeralan NiTi alaşımının talaşlı imalatı sırasında karşılaşılan yüksek takım aşınmaları ve kötü yüzey kaliteleri, olumsuz bir özellik olarak karşımıza çıkmaktadır. Bununla birlikte bu malzemeyi sıradan bir mühendislik malzemesi gibi değerlendirmek yanlıştır. Çünkü talaşlı imalattan dolayı işlenmiş malzemenin yüzeyaltı özellikleri dediğimiz yüzey bütünlüğü karakteristiklerinde değişimler meydana gelmektedir. Bu değişimler malzemenin şekil hafıza özelliğine etki etmekte, bu etkilerin ürün performansına etkilerinin iyi anlaşılması için incelenmesi önem arz etmektedir.

Yapılan bu çalışmada, ısıl işlem uygulanan NiTi alaşımın, talaşlı imalat performansı ve yüzey bütünlüğü karakteristiklerinde meydana gelen değişimler farklı kesme parametreleri ve koşullarında incelenmiştir. Yüksek basınçlı soğutma koşulu(HPC) işlenmiş parçanın yüzey kalitesine olumsuz etki yaparken, özellikle karbondioksit(CO_2) ile kriyojenik soğutma koşulu işlenmiş malzemenin mikrosertliğini arttırmış ve yüzey bütünlüğü karakteristiklerini iyileştirmesi açısından (mikrosertlik, mikroyapı, XRD) en iyi koşul olarak ön plana çıkmıştır.

Anahtar Kelimeler: Şekil hafızalı NiTi alaşım, Talaşlı imalat, Yüzey bütünlüğü

ABSTRACT

INVESTIGATION OF MACHINING-INDUCED SURFACE INTEGRITY CHARACTERISTICS OF NiTi SHAPE MEMORY ALLOY

The use of NiTi shape memory alloy (SMA) in the aerospace and biomedical industry is becoming increasingly common. Especially because of its superelasticity and shape memory property which allows it to return to its original state when the effect of force and temperature removed after deformation, it is used in implant production. The fact that phase transformation temperatures are close to human body temperature is another factor that extends its use.

Unlike other engineering materials, one of the weak points of the NiTi alloy is difficult to machining. High tool wear and poor surface qualities encountered during machining of NiTi alloy, which is among the hard to work materials, are a negative feature. However, evaluating this material as an ordinary engineering material is wrong. This is because of changing of the surface integrity characteristics of the machined material due to the machining process. These changes affect the shape memory properties of the material and it is important to examine of these effects on the product performance.

In this study, the changes in machining performance and surface integrity characteristics of NiTi alloy, which are heat treated, have been investigated under different cutting parameters and conditions. High pressure cooling condition (HPC) has a negative effect on the surface quality of the machined part, especially the cryogenic cooling condition with carbon dioxide(CO_2) has increased the microhardness of the machined part and it has become the best condition for improving the surface integrity characteristics (microhardness, microstructure, XRD).

Keywords: NiTi shape memory alloy, Machining, Surface integrity

SEMBOLLER

ap : Kesme derinliği (mm)
f : İlerleme değeri (mm/dev)
V_c : Kesme hızı (m/dak)
R : Evrensel gaz sabiti
Q : Aktivasyon enerjisi (J/mol)
Ra : Yüzey pürüzlülüğü
F_c :Esas kesme kuvveti (N)
F_r :Radyal kuvvet (N)
F_f :İlerleme kuvveti
T :Sıcaklık (°C)
VB_{Bmax}:Serbest yüzey aşınması
VB_C :Burun aşınması
r_c :Takım burun yarıçapı

KISALTMALAR

SMA : Şekil Hafızalı Alaşım

HPC : Yüksek basınçlı soğutma

CO2 : Karbondioksit

LN_2 : Sıvı azot

MQL : Minimum miktarda yağlama

SEM : Taramalı elektron mikroskobu

XRD : X Işınımı kırınım yöntemi

B2 : Östenit

B19 : Martenzit

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1. NiTi alaşımın kristal yapıları a)östenit-ortorombik b)martenzit-monoklinik[4] 1

Şekil 1.2. Şekil hafızalı alaşımların kullanım alanları a)savaş uçağı hidrolik boru bağlantı araçları(kaplin) [10] b)kalça implantı [5] c)havacılık endüstrisi [11] 2

Şekil 1.3. Şekil hafızalı NiTi alaşımın deformasyon ve şekil hafıza davranışının 3 boyutlu olarak gerilme-şekil değiştirme-sıcaklık diyagramında gösterimi [13] 3

Şekil 1.4. Şekil hafızalı alaşımların histerizis eğrisi [14] 4

Şekil 1.5. Şekil hafızalı NiTi alaşımın sıcaklık ve gerilmeye bağlı kristal yapısındaki değişim mekanizmaları [13] 4

Şekil 2.1. Isıl işlem fırını 8

Şekil 2.2. NiTi alaşım malzemesi 9

Şekil 2.3. İşlem görmemiş NiTi alaşıma ait XRD sonucu 10

Şekil 2.4. İşlem görmemiş NiTi alaşıma ait XRD sonucu 11

Şekil 2.5. Doosan Puma GT2100 CNC torna tezgahı 12

Şekil 2.6.Takım tutucu ve kesici ucun görüntüsü 13

Şekil 2.7. Deney düzeneğinin gösterimi 13

Şekil 2.8. Soğutucu/yağlayıcıların uygulanışı a)kuru kesme b)kesme sıvısı c)HPC d)CO_2 14

Şekil 2.9. Amplifikatör ve veri toplayıcı 15

Şekil 2.10. (a) Termal kamera (b) sıcaklık ölçümü 16

Şekil 2.11. Yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazı 16

Şekil 2.12. Yüzey bütünlüğü analizinde izlenen yolun şematik gösterimi 17

Şekil 2.13. Metalografik analiz için iş parçasından alınan kesitlerin gösterilişi 17

Şekil 2.14. İşlenmiş NiTi iş parçasından yüzey bütünlüğü analizi için alınan kesit numunenin kesildiği hasas kesme cihazı 18

Şekil 2.15. Mikroyapı analizleri için hazırlanan numunedeki incelenen yüzey 18

Şekil 2.16. Multipol Advanced Plus Zımparalama ve Parlatma Cihazı 19

Şekil 2.17. Future-Tech sertlik ölçme cihazı 19

Şekil 2.18. Dağlama sırasında zararlı gazların tahliyesi için gerekli çeker ocak 20

Şekil 2.19. Mikroyapı görüntülerinin alındığı dijital optik mikroskop 20

Şekil 2.20. XRD ölçüm sistemi ve ölçülen numunelere ait görüntü 21

Şekil 4.1. Farklı kesme koşulları ve kesme hızlarında yapılan talaş kaldırma operasyonlarında oluşan esas kesme kuvvetleri (f=0.08 mm/dev) 23

Şekil 4.2. Farklı kesme koşulları ve kesme hızlarında yapılan talaş kaldırma operasyonlarında oluşan radyal kuvvetler (f=0.08 mm/dev) 24

Şekil 4.3. Farklı kesme koşulları ve kesme hızlarında yapılan talaş kaldırma operasyonlarında oluşan ilerleme kuvvetleri (f=0.08 mm/dev) 25

Şekil 4.4. Farklı kesme koşulları ve kesme hızlarında yapılan talaş kaldırma operasyonlarında oluşan esas kesme kuvvetleri (f=0.16 mm/dev)..... 26

Şekil 4.5. Farklı kesme koşulları ve kesme hızlarında yapılan talaş kaldırma operasyonlarında oluşan radyal kuvvetler (f=0.16 mm/dev)..... 27

Şekil 4.6. Farklı kesme koşulları ve kesme hızlarında yapılan talaş kaldırma operasyonlarında oluşan ilerleme kuvvetleri (f=0.16 mm/dev) 28

Şekil 4.7. Kuru ve CO2 koşulunda yapılan talaş kaldırma operasyonları sırasında kesme hızına bağlı olarak ölçülen kesme sıcaklıkları..... 30

Şekil 4.8. Farklı kesme koşulları ve kesme hızlarında yapılan talaş kaldırma operasyonlarında oluşan serbest yüzey aşınma görüntüleri (f=0.08 mm/dev) 31

Şekil 4.9. Farklı kesme koşulları ve kesme hızlarında yapılan talaş kaldırma operasyonlarında oluşan serbest yüzey aşınma değerleri (f=0.08 mm/dev)..... 32

Şekil 4.10. Farklı kesme koşulları ve kesme hızlarında yapılan talaş kaldırma operasyonlarında oluşan serbest yüzey aşınma görüntüleri (f=0.16 mm/dev) 33

Şekil 4.11. Farklı kesme koşulları ve kesme hızlarında yapılan talaş kaldırma operasyonlarında oluşan serbest yüzey aşınma değerleri (f=0.16 mm/dev)..... 34

Şekil 4.12. Farklı kesme koşulları ve kesme hızlarında yapılan talaş kaldırma operasyonlarında oluşan burun aşınma görüntüleri (f=0.08 mm/dev) 35

Şekil 4.13. Farklı kesme koşulları ve kesme hızlarında yapılan talaş kaldırma operasyonlarında oluşan burun aşınma değerleri (f=0.08 mm/dev)..... 36

Şekil 4.14. Farklı kesme koşulları ve kesme hızlarında yapılan talaş kaldırma operasyonlarında oluşan burun aşınma görüntüleri (f=0.16 mm/dev) 37

Şekil 4.15. Farklı kesme koşulları ve kesme hızlarında yapılan talaş kaldırma operasyonlarında oluşan burun aşınma değerleri (f=0.16 mm/dev)..... 38

Şekil 4.16. Farklı kesme koşulları ve kesme hızlarında yapılan talaş kaldırma operasyonlarında oluşan takım-talaş temas alanı görüntüleri (f=0.08 mm/dev) 39

Şekil 4.17. Farklı kesme koşulları ve kesme hızlarında yapılan talaş kaldırma operasyonlarında oluşan takım-talaş temas alanı değerleri (f=0.08 mm/dev)..... 40

Şekil 4.18. Farklı kesme koşulları ve kesme hızlarında yapılan talaş kaldırma operasyonlarında oluşan takım-talaş temas alanı görüntüleri (f=0.16 mm/dev) 41

Şekil 4.19. Farklı kesme koşulları ve kesme hızlarında yapılan talaş kaldırma operasyonlarında oluşan takım-talaş temas alanı değerleri (f=0.16 mm/dev)..... 42

Şekil 4.20. Farklı kesme koşulları ve kesme hızlarında yapılan talaş kaldırma operasyonlarında iş parçası yüzey topoğrafi görüntüleri (f=0.08 mm/dev) 43

Şekil 4.21. Farklı kesme koşulları ve kesme hızlarında yapılan talaş kaldırma operasyonlarında iş parçası yüzey topoğrafi görüntüleri (f=0.16 mm/dev) 44

Şekil 4.22. Farklı kesme koşulları ve kesme hızlarında yapılan talaş kaldırma operasyonlarında iş parçası yüzey pürüzlülüğü değerleri (f=0.08 mm/dev) 47

Şekil 4.23. Farklı kesme koşulları ve kesme hızlarında yapılan talaş kaldırma operasyonlarında iş parçası yüzey pürüzlülüğü değerleri (f=0.16 mm/dev) 47

Şekil 4.24. Farklı kesme koşulları ve kesme hızlarında yapılan talaş kaldırma operasyonlarında elde edilen talaş görüntüleri (f=0.08 mm/dev)..... 49

Şekil 4.25. Farklı kesme koşulları ve kesme hızlarında yapılan talaş kaldırma operasyonlarında elde edilen talaş görüntüleri (f=0.16 mm/dev)..... 50

Şekil 4.26. Farklı kesme koşulları ve kesme hızlarında yapılan talaş kaldırma operasyonlarında 300X büyütmede alınan mikroyapı görüntüleri (f=0.08 mm/dev)..... 53

Şekil 4.27. Farklı kesme koşulları ve kesme hızlarında yapılan talaş kaldırma operasyonlarında 1000X büyütmede alınan mikroyapı görüntüleri (f=0.08 mm/dev)... 54

Şekil 4.28. Farklı kesme koşulları ve kesme hızlarında yapılan talaş kaldırma operasyonlarında 300X büyütmede alınan mikroyapı görüntüleri (f=0.16 mm/dev)..... 55

Şekil 4.29. Farklı kesme koşulları ve kesme hızlarında yapılan talaş kaldırma operasyonlarında 1000X büyütmede alınan mikroyapı görüntüleri (f=0.16 mm/dev)... 56

Şekil 4.30. Farklı kesme koşullarında 20 m/dak kesme hızında yapılan talaş kaldırma operasyonlarında işlenmiş yüzeyden itibaren mikrosertlik değişimleri (f=0.08 mm/dev) 58

Şekil 4.31. Farklı kesme koşullarında 70 m/dak kesme hızında yapılan talaş kaldırma operasyonlarında işlenmiş yüzeyden itibaren mikrosertlik değişimleri (f=0.08 mm/dev) 59

Şekil 4.32. Farklı kesme koşullarında 20 m/dak kesme hızında yapılan talaş kaldırma operasyonlarında işlenmiş yüzeyden itibaren mikrosertlik değişimleri (f=0.16 mm/dev) 60

Şekil 4.33. Farklı kesme koşullarında 70 m/dak kesme hızında yapılan talaş kaldırma operasyonlarında işlenmiş yüzeyden itibaren mikrosertlik değişimleri (f=0.16 mm/dev) 61

Şekil 4.34. Farklı kesme koşullarında yapılan talaş kaldırma operasyonu sonrası elde edilen XRD profilleri (Vc=20 m/dak, f=0.08 mm/dev) 62

Şekil 4.35. Farklı kesme koşullarında yapılan talaş kaldırma operasyonu sonrası elde edilen XRD profilleri (Vc=45 m/dak, f=0.08 mm/dev) 63

Şekil 4.36. Farklı kesme koşullarında yapılan talaş kaldırma operasyonu sonrası elde edilen XRD profilleri (Vc=70 m/dak, f=0.08 mm/dev) 64

Şekil 4.37. Farklı kesme koşullarında yapılan talaş kaldırma operasyonu sonrası elde edilen XRD profilleri (Vc=20 m/dak, f=0.16 mm/dev) 65

Şekil 4.38. Farklı kesme koşullarında yapılan talaş kaldırma operasyonu sonrası elde edilen XRD profilleri (Vc=45 m/dak, f=0.16 mm/dev) 66

Şekil 4.39. Farklı kesme koşullarında yapılan talaş kaldırma operasyonu sonrası elde edilen XRD profilleri (Vc=70 m/dak, f=0.16 mm/dev) 66

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1. Ergitme, işleme, ısıl işlem ve martezit başlangıç(M_s), martenzit bitiş(M_f), östenit başlangıç(A_s), östenit bitiş(A_f) sıcaklıkları (ºC) 9

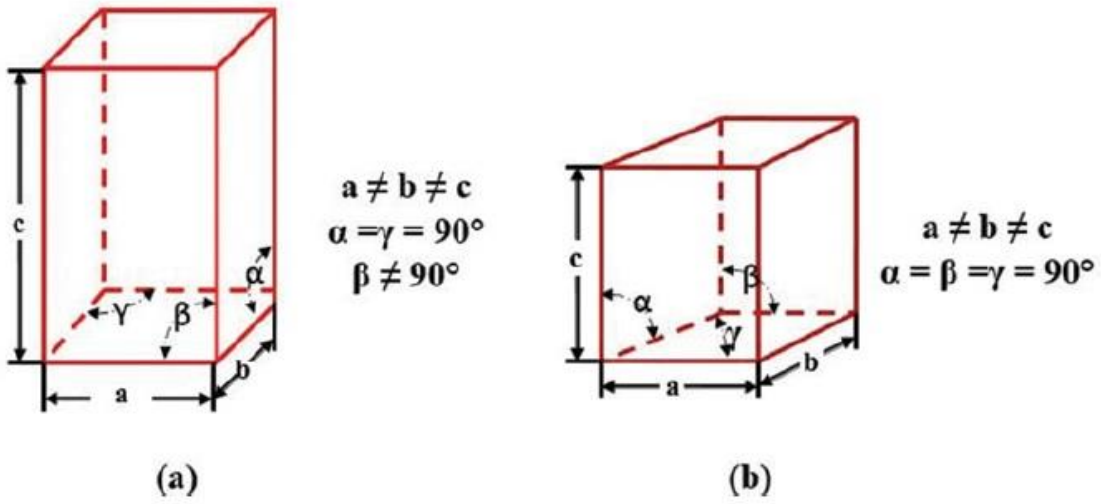
Tablo 2.2. NiTi alaşım malzemesine ait elastik ve termal özellikler 10

Tablo 2.3. Doosan Puma marka GT 2100 model CNC tornanın özellikleri 12

Tablo 2.4. Talaş kaldırma işleminin gerçekleştirildiği farklı soğutucu/yağlayıcı kesme koşulları ve değişik kesme parametreleri 15

1. GİRİŞ

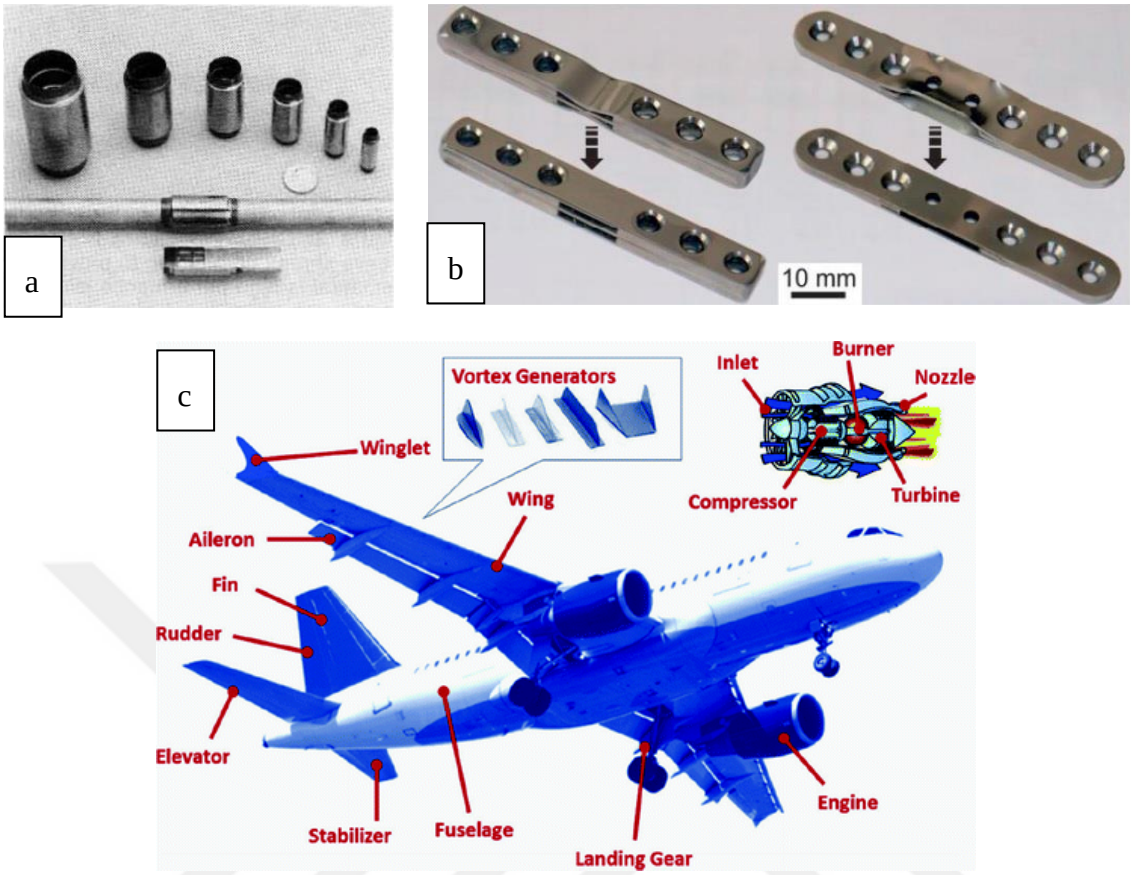
Şekil hafızalı alaşımlar, diğer mühendislik malzemelerinden farklı özelliklere sahip özel malzemeler olarak bilinmektedir. Bu malzemeler metalik malzemeler olup, alaşıma uygulanan sıcaklık ve gerilmenin etkisi ile faz dönüşümüne uğramakta, deforme edildikten sonra ilk halini hatırlayıp, deforme edilmeden önceki haline geri dönebilmektedir. Şekil hafızalı alaşımların katı hal faz dönüşümü[1], düşük sıcaklık fazı olan martenzit ve yüksek sıcaklık fazı olan östenit fazları arasında olmaktadır. Özellikle faz dönüşüm özelliği dolayısıyla yüksek şekil değiştirme (%8 e kadar), gerilme (400 MPa kadar) ve iş (10 MJ/m3 kadar) üretebilmektedir [2] [3]. NiTi alaşımın martenzit ve östenit fazdayken sahip olduğu kristal yapılar Şekil 1.1' de gösterilmiştir.



Şekil 1.1. NiTi alaşımın kristal yapıları a)östenit-ortorombik b)martenzit-monoklinik[4]

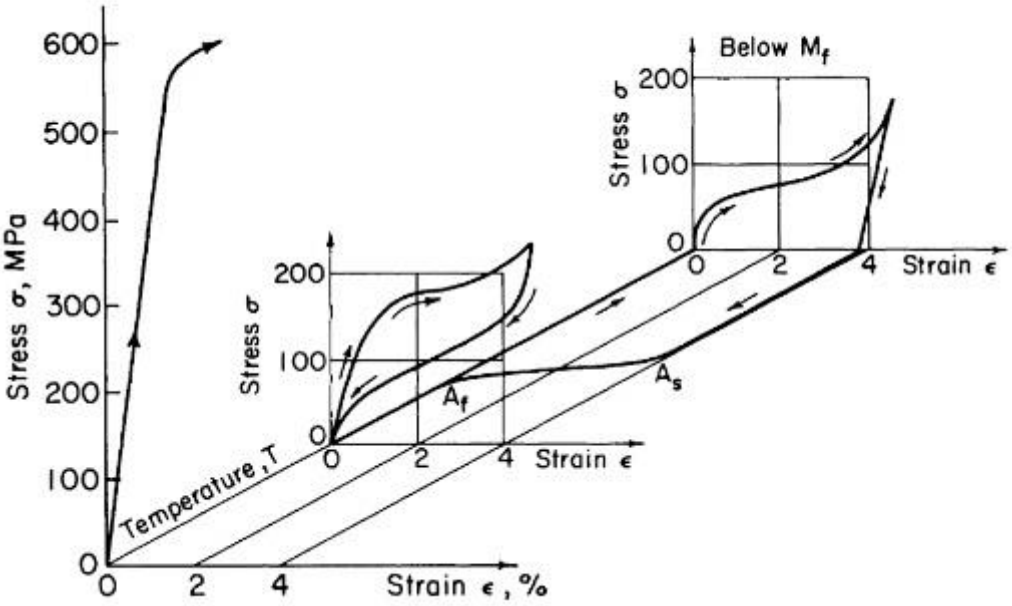
Sahip oldukları bu özelliklerinden dolayı şekil hafızalı alaşımlar başta uzay, havacılık ve biyomedikal sektörü olmak üzere, hidrolik pnomatik sistemlerde, bağlantı elemanı olarak, binalarda depreme karşı sönümleyici olarak, inşaat ve robot endüstrisi gibi alanlarda kendisine kullanım alanı bulmuştur [5-7] [3]. Şekil hafızalı alaşımların kullanım alanlarına örnekler Şekil 1.2' de sunulmuştur.

İlk olarak Au-Cd alaşım malzemelerinde şekil hafıza etkisi 1951 yılında incelenmiştir [8]. Ancak ABD donanması tarafından 1965 yılında şekil hafızalı NiTi alaşımın (Nitinol) keşfedilmesiyle, nitinol ismi altında patenti alınmıştır [9].



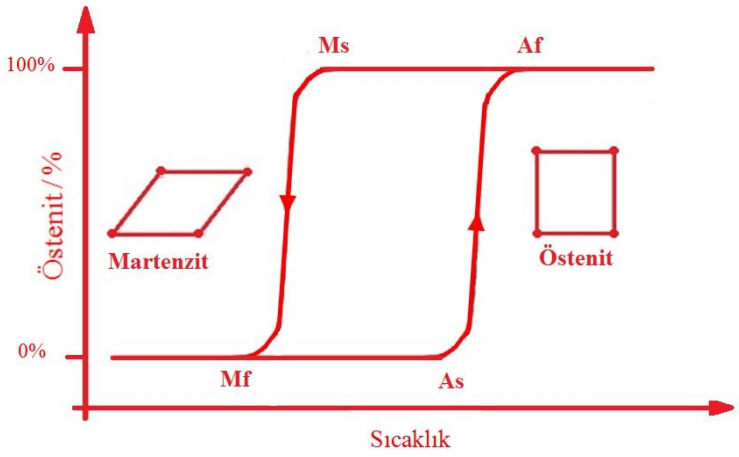
Şekil 1.2. Şekil hafızalı alaşımların kullanım alanları a)savaş uçağı hidrolik boru bağlantı araçları(kaplin) [10] b)kalça implantı [5] c)havacılık endüstrisi [11]

Şekil hafızalı alaşımların deformasyon davranışları östenit fazda iken diğer mühendislik malzemelerine benzer şekildedir [12]. Ancak martenzit fazda iken malzemenin süperelastik ve şekil hafıza özelliğinden dolayı diğer malzemelerden farklı özellik gösterdiği görülmektedir [2]. Farklı fazlarda farklı özelliklerde davranışlar sergileme olayı Şekil 1.3' te ki şekil hafızalı alaşım malzemelerin gerilme-şekil değiştirme, şekil hafıza ve süperelastik özelliklerinin gösterildiği grafikte açık şekilde görülmektedir [13].



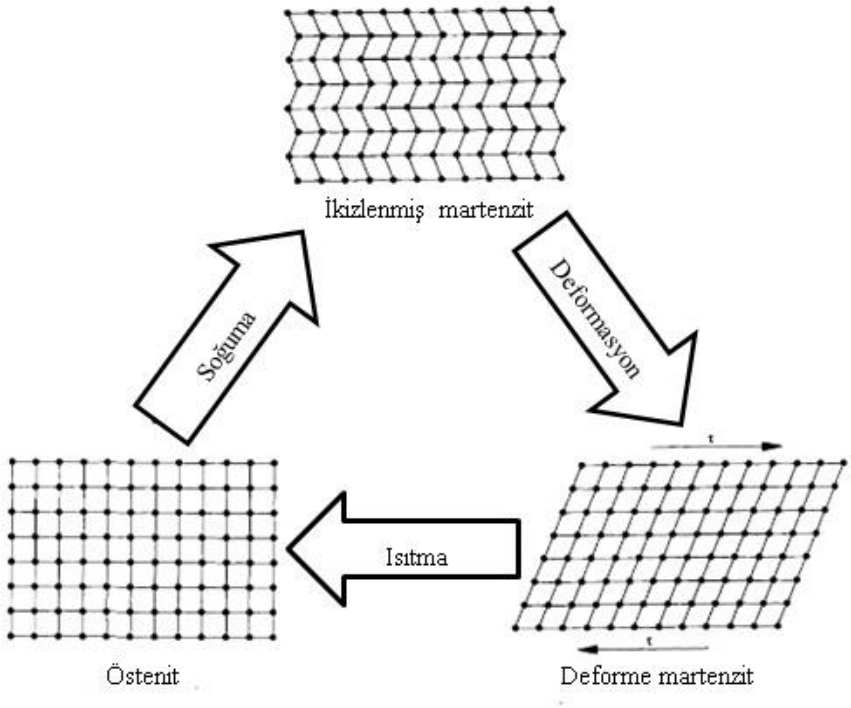
Şekil 1.3. Şekil hafızalı NiTi alaşımın deformasyon ve şekil hafıza davranışının 3 boyutlu olarak gerilme-şekil değiştirme-sıcaklık diyagramında gösterimi [13]

Şekil hafızalı alaşımların martenzit-östenit fazları arasındaki geçişlerin tekrarlanmaları esnasında histerezis adı verilen bir çevrim oluşmaktadır [14]. Bu çevrimi oluşturan 4 ana sıcaklık değeri mevcuttur. Bunlar dönüşümün başladığı östenit başlangıç sıcaklığı (As), dönüşümün bittiği östenit bitiş sıcaklığı (Af), martenzit başlangıç sıcaklığı (Ms) ve martenzit bitiş (Mf) sıcaklıklarıdır. Şekil hafızalı alaşımlar, bu sıcaklık değerlerinde martenzit ve östenit başlangıç ve bitiş sıcaklıkları arasında karışık bir düzen hakimdir [15]. Örneğin, Ms sıcaklığından As sıcaklığına geçişte aradaki histerisizde, malzeme ne martenzit ne de östenittir. Şekil hafızalı alaşımların sıcaklığa bağlı histerizis eğrisi Şekil 1.4' te gösterilmiştir.



Şekil 1.4. Şekil hafızalı alaşımların histerizis eğrisi [14]

Ayrıca şekil hafızalı alaşım malzemelerinin sıcaklık ve gerilmenin etkisiyle faz ve kristal yapısında ki değişimler Şekil 1.5' de görüldüğü gibidir. Martenzit fazdaki malzeme deformasyona uğradığında, ikizlenmiş martenzite dönüşmektedir. Deforme edilmiş martenzit fazdaki malzeme östenit fazı sıcaklığına ısıtıldığında deforme edilmeden önceki haline geri dönmekte ve bu dönüşümlerin etkisiyle kristal yapıda da değişimler meydana gelmektedir [2, 13].



Şekil 1.5. Şekil hafızalı NiTi alaşımın sıcaklık ve gerilmeye bağlı kristal yapısındaki değişim mekanizmaları [13]

Yapılan çalışmalar göstermiştir ki, şekil hafıza özellikleri ve malzeme özellikleri, termo-mekanik etkilerle(talaşlı imalat gibi) kontrol altına alınabilmektedir. Talaş kaldırma operasyonu boyunca oluşan iç gerilmeler, faz dönüşümü için gerekli kritik gerilme ve iki yönlü şekil hafıza özelliğini etkileyebilmektedir [16]. Talaş kaldırma operasyonlarında kesme parametreleri ve koşullarının değişmesi, yüzey bütünlüğü karakteristiklerini de etkilemektedir [17, 18].

Özellikle kesilmesi zor malzemeler grubundaki mühendislik malzemelerinin işlenmesi, imalat sektörünün en büyük problemlerinden biridir. Şekil hafızalı NiTi alaşımın sahip olduğu yüksek süneklik ve elastikiyet ve düşük termal iletkenlik dolayısıyla talaşlı imalatı sırasında oluşan çapaklar kesme işlemini zorlaştırmaktadır [19, 20]. Birbiriyle temas halinde çalışacak parçaların yüzey kaliteleri, parçanın dayanımı ve yorulma ömrü açısından önem arz eden bir durumdur [21]. Dolayısıyla bu malzemenin talaşlı imalatı için uygun parametrelerin seçimi önemlidir.

NiTi alaşımın talaşlı imalatıyla ilgili çalışmalar incelendiğinde; Guo ve arkadaşları şekil hafızalı NiTi alaşım malzemesinin frezelenmesinde, ilerleme değerinin kesici takım serbest yüzey aşınmasına etkisini kesme uzunluğuna bağlı olarak incelemişlerdir. Hem ilerleme değeri hem de kesme uzunluğunun artmasıyla serbest yüzey aşınmasının arttığı görülmüştür [22]. Weinert ve arkadaşları yaptıkları tornalama ve delik delme operasyonlarında işleme performansını incelemişler, elde edilen bulgular göstermiş ki, takımda meydana gelen serbest yüzey aşınması ve malzemenin psedoplastiklik özelliğinden kaynaklanan istenmeyen talaş türü kötü işleme performansı elde edilmesine neden olmuştur [23]. Yine Weinert ve arkadaşlarının yaptığı bir başka çalışmada, tornalama operasyonu sırasında oluşan istenmeyen talaş formları ve kesici takımda meydana gelen serbest yüzey ve çentik aşınmaları, NiTi alaşımın işlenmesinin zorluklarını gözler önüne sermiştir [24]. Bir başka çalışmada da NiTi malzemeden mikro boyuttaki komponentlerin mikrofrezeleme yöntemiyle işlenebilmesi incelenmiştir [25]. Gaikwad ve arkadaşlarının çalışmasında, Taguchi yöntemi kullanılarak elektroerozyon (EDM) işleminde optimum talaş kaldırma oranı 7,0806 mm^3/dak olarak bulunmuştur [26]. Literatürde ayrıca ultrasonik vibrasyon yardımlı EDM ve tornalama gibi NiTi alaşımı işlemede kullanılan farklı yöntemler de mevcuttur [27, 28]. NiTi alaşımın işlenebilme performansı üzerine yapılan kapsamlı çalışmalardan birinde, Kaynak ve arkadaşları NiTi alaşımın tornalanması işleminde kuru, minimum miktarda yağlama

(MQL) ve sıvı azot (LN_2) ile kriyojenik işleme koşullarında kesme süresine bağlı olarak kesici takımda oluşan serbest yüzey ve burun aşınmalarını incelemiş, kriyojenik işlemenin takım aşınmasını azaltıcı etkisini göstermişlerdir [29]. Bir başka çalışmalarında, farklı ısıl işlemlere tabi tutulmuş NiTi iş parçalarının tornalamasında soğutucu/yağlayıcıların takım aşınmasına etkisini araştırmışlardır [30]. Takım aşınmasının incelendiği çalışmalarda; kesme kuvvetleri kuru, ön ısıtılmış ve kriyojenik koşullarda kıyaslanmış [31], farklı bir çalışmada ise kesme hızına bağlı olarak takım burun ve krater aşınması ve yüzey kalitesi incelenmiştir [32]. Diğer bir çalışmada, işlenebilme performansı üzerine faz etkisi kesme kuvvetleri, takım aşınması ve talaş formu bakımından araştırılmıştır [33].

Her ne kadar NiTi alaşımın talaşlı imalatı sırasında karşılaşılan zorluklara çözüm arama kapsamında yapılan mevcut çalışmalar bir hayli fazla olsa da, bu malzemenin en önemli özelliği olan şekil hafıza etkisinin iyi anlaşılması hususunda yüzey bütünlüğü üzerine çalışmaların yapılması gerekmektedir.

Yüzey bütünlüğü teriminin ilk kez tanımlanması ve bu konu üzerine ilk çalışmaların geçmişi 1972 yılına dayanmaktadır [34]. Günümüzde yapılan çalışmalar dikkate alındığında, yüzey bütünlüğünün kapsamının genişlediği görülmektedir [21]. Öyle ki, bu kapsamda yüzey bütünlüğünü üç ana başlıkta a)metalurjik b)mekanik c)topoğrafik olmak üzere toplayabiliriz. Birbiriyle temas halinde çalışan ve dinamik yüklere maruz kalan parçaların imalatında yüzey bütünlüğü karakteristikleri önemli parametreler olarak karşımıza çıkmaktadır [35]. Talaşlı imalat yapılan mühendislik malzemelerinin yüzey bütünlüğü karakteristiklerine etki eden parametreler arasında, kesici takımda meydana gelen aşınmalar ve kesme sıcaklığı gösterilebilmektedir. Fakat talaş kaldırma operasyonlarında, işleme performansını iyileştirmek adına kullanılan soğutucu ve yağlayıcı sıvıların da yüzey bütünlüğüne etkileri gözardı edilmemesi gereken önemli parametreler konumundadır. Literatürde NiTi alaşımın talaşlı imalatında kullanılan soğutucu ve yağlayıcı koşullar arasında sıvı azotun kriyojenik uygulanması, minimum miktarda yağlama örnek verilebilir [17].

Literatürde NiTi alaşımın yüzey bütünlüğü karakteristiklerinin incelendiği çalışmalara bakıldığında, Kaynak ve arkadaşları yaptıkları bir çalışmada NiTi alaşımı kuru, ön ısıtılmış ve sıvı azot ile kriyojenik koşullarda talaşlı işlenmesinin faz dönüşüm

sıcaklıkları üzerine etkisini incelemişlerdir. Yapılan XRD analizinde işlenmemiş malzemedeki martenzit piklerinin kaybolduğu ve östenite dönüştüğü ve DSC analizi ile faz dönüşüm sıcaklıklarının değiştiği görülmüştür [36]. Kaynak ve arkadaşları yaptıkları bir başka çalışmada ise, NiTi alaşımın kuru ve kriyojenik işlenmesinde, kesme hızının ve kesme koşulunun işlenmiş malzemenin yüzeyaltı sertliğine etkisini ve talaş kaldırma operasyonundan etkilenmiş katman kalınlığını incelemişlerdir [37]. Yapılan başka bir çalışmada ise kriyojenik, MQL, kuru kesmede yapılan talaş kaldırma operasyonunda, kesme hızının ve kesme koşullarının işlenmiş malzeme yüzey kalitesine etkisi ve XRD analizi incelenmiştir. Özellikle XRD analizinde, kriyojenik koşulda B19 martenzit pikin oluştuğu görülmüştür [32]. Kriyojenik işlemenin etkisinin araştırıldığı bir başka çalışmada ise işlenmiş malzemelerin mikroyapıları incelenmiş, kriyojenik işlemeden kaynaklı etkilenmiş katman kalınlığının, kuru kesmedekinden yaklaşık 3 kat fazla olduğu görülmüştür [33]. Weinert ve arkadaşları yaptıkları çalışmalarında, NiTi alaşımda delik delinmesi operasyonunda, delik kenarından yaklaşık 200 µm ye kadar sertlikte artış olduğunu mikroyapıyla birlikte göstermişlerdir [38]. Yine bir başka delik delme operasyonunda, kenardan 140 µm kadar sertlikte meydana gelen değişimler incelenmiş, düşük kesme hızlarında daha çok sertlik artışının yaşandığı raporlanmıştır [39]. Guo ve arkadaşları farklı ilerleme hızlarında yaptıkları deneylerde ilerlemenin artmasıyla sertlikte artışın meydana geldiğini belirtmişlerdir [22].

Bu tez çalışmasında, daha önce literatürde Kaynak ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmanın devamı niteliğinde olan NiTi alaşım malzemesinin kuru, MQL ve LN_2 koşullarında işlenmesinin takım aşınması ve yüzey kalitesine etkisinin incelendiği ön çalışmalar yapılmıştır [30]. Bu ön çalışmalar neticesinde, talaşlı imalat performansının ve yüzey bütünülüğü karakteristiklerinin daha iyi anlaşılması hususunda farklı soğutucu ve yağlayıcı koşullar ile farklı kesme parametreleri ve kesici takım seçilmiş ve asıl deneyler gerçekleştirilmiştitr. Yukarıda bahsedilen literatürde daha önce yapılmış çalışmalar incelendiğinde, aslında NiTi alaşımın işleme performansı ve yüzey bütünlüğü üzerine yapılan çalışmaların mevcut olduğu görülmektedir. Ancak bu çalışmada daha önceki çalışmalardan farklı olarak, ısıl işlem uygulanmış NiTi alaşımın yüzey bütünlüğü karakteristikleri üzerine henüz yapılmış bir çalışmanın mevcut olmadığı görülmektedir. Bu tezde yapılan çalışmalar neticesinde, farklı kesme parametreleri ve farklı bir kesici takım ile bu malzemenin işlenmesinde literatürde ilk defa yüksek basınçlı soğutma(HPC)

ve karbondioksit ile kriyojenik soğutma koşulları kullanılarak yapılan talaş kaldırma operasyonlarında, yüzey bütünlüğü karakteristikleri ilk defa incelenmiş, işleme performansı üzerine ise daha kapsamlı incelenmeler yapılmıştır.

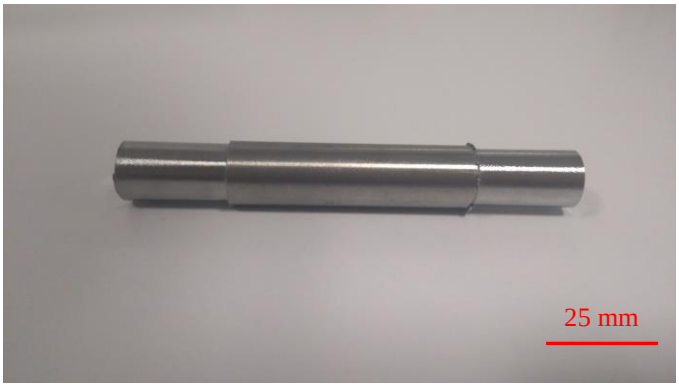
2. DENEYSEL ÇALIŞMA VE DÜZENEKLER

2.1 Deneysel Çalışmada Kullanılan İş Malzemesi

Bu çalışmada kullanılan iş parçası vakum ark ergitme (VAR) yöntemiyle üretildikten sonra sıcak haddeleme ve 750 ºC sıcaklıkta 30 dk boyunca tavlama işlemine tabi tutulmuş, oda sıcaklığında östenit fazda ve yapısında %50.8 oranında Ni elementi bulunan 12.5 mm çapında silindir geometriye sahip NiTi Şekil Hafızalı Alaşımıdır. Isıl işlem fırını Şekil 2.1'de gösterilmiştir. Tornalama operasyonları iş parçasının her iki tarafından 25 mm talaş kaldırılarak gerçekleştirilmiştir. NiTi alaşımı malzemesi Şekil 2.2'de gösterilmektedir.



Şekil 2.1. Isıl işlem fırını



Şekil 2.2. NiTi alaşım malzemesi

Şekil hafızalı alaşımlar ısı ve yük uygulandığında şekil değiştirip östenitten martenzit faza, martenzit fazdan östenit faza geçiş yapabilen ve bu etkiler ortadan kalktığında eski haline geri dönebilen özel malzemeler olmalarından dolayı bu malzemeyi değerlendirirken sıcaklık faktörünü unutmamak gerekir [4, 21]. Alaşımın faz dönüşüm sıcaklıkları kırınım tarama kalorimetresi (DSC) yöntemiyle ölçülmüş ve uygulanan işlemler Tablo 2.1' de verilmiştir. Tablo 2.1' deki faz dönüşüm sıcaklık değerleri düşünüldüğünde bu çalışmada iş parçası olarak kullanılan NiTi alaşımın işlem görmeden önce oda sıcaklığında östenit fazda olduğu görülmektedir.

Tablo 2.1. Ergitme, işleme, ısıl işlem ve martezit başlangıç(M_s), martenzit bitiş(M_f), östenit başlangıç(A_s), östenit bitiş(A_f) sıcaklıkları (ºC)

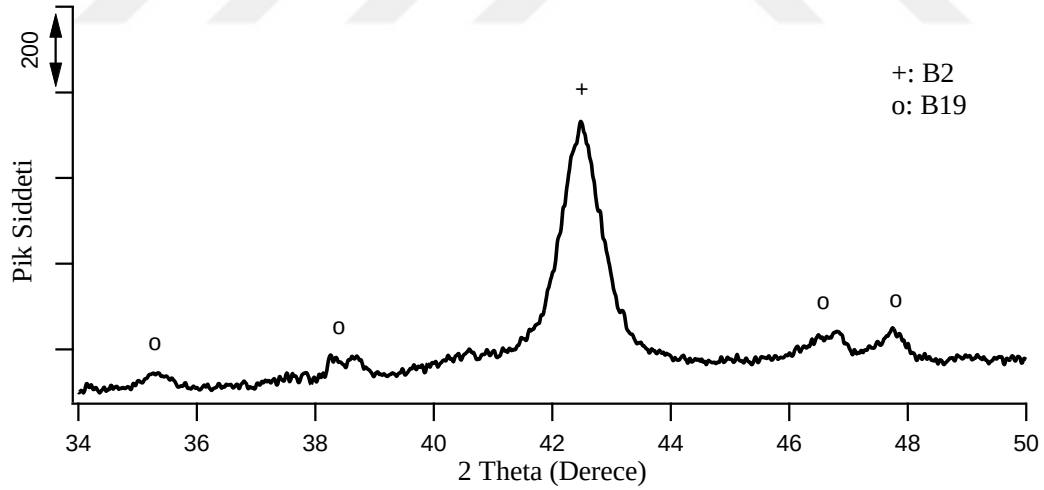
Ergitme Yöntemi	**Uygulanan İş**	**Isıl İşlem**	**M_s**	**M_f**	**A_s**	**A_f**
VAR	Sıcak haddeleme	Tavlama	-32	-71	-43	-11

Bu çalışmada kullanılan Şekil Hafızalı NiTi alaşım yapısında %50.8 Ni ve %49.2 Ti elementi bulundurmakta, alaşımın termal ve elastik özellikleri Tablo 2.2'de sunulmuştur.

Tablo 2.2. NiTi alaşım malzemesine ait elastik ve termal özellikler

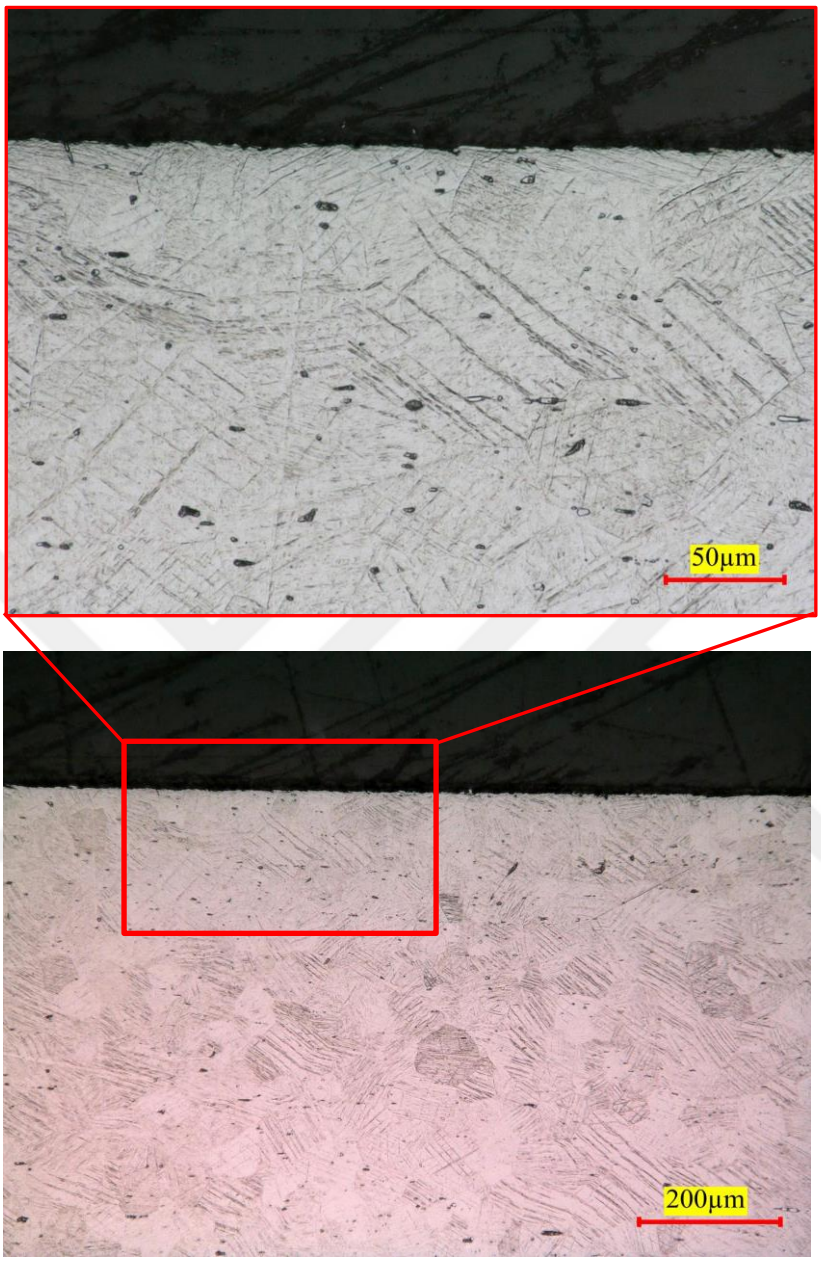
	NiTi(Östenit faz)	**NiTi(Martenzit faz)**
Young Modülü (GPa)	75	41
Poison Oranı	0.3	0.3
Isıl İletkenlik(W/m.K)	18	8.6
Termal genleşme katsayısı	$11x10^{-6}$	$6.6x10^{-6}$
Isı kapasitesi (J/g.°C)	0.837	0.320

Şekil 2.3'te işlem görmemiş NiTi alaşım malzemesinden alınan numunenin faz şiddetleri, bölgeleri ve kristal düzlemleri sunulmuştur.



Şekil 2.3. İşlem görmemiş NiTi alaşıma ait XRD sonucu

Şekil hafızalı NiTi alaşım malzemesinin talaşlı imalat operasyonu yapılmadan önce (asreceive) dijital optik mikroskop ile alınmış mikroyapı görüntüsü Şekil 2.4'te gösterilmiştir.



Şekil 2.4. İşlem görmemiş NiTi alaşıma ait XRD sonucu

2.2 CNC Torna Tezgahı, Takım Tutucular ve Kesici Takım

Talaş kaldırma deneyleri Doosan Puma GT2100 CNC torna tezgahında yapılmış olup, cihaza ait teknik özellikler Tablo 2.3'te ve cihazın resmi Şekil 2.5'te sunulmuştur.

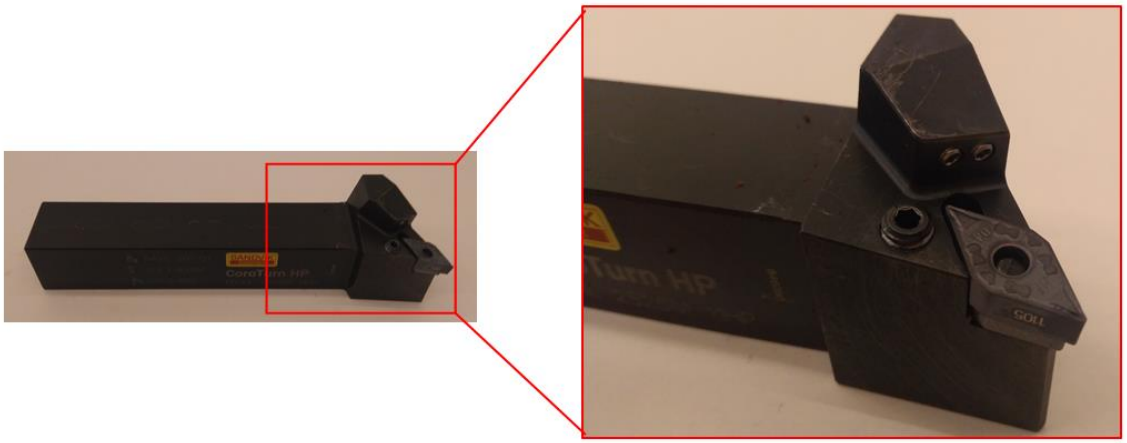


Şekil 2.5. Doosan Puma GT2100 CNC torna tezgahı

Tablo 2.3. Doosan Puma marka GT 2100 model CNC tornanın özellikleri

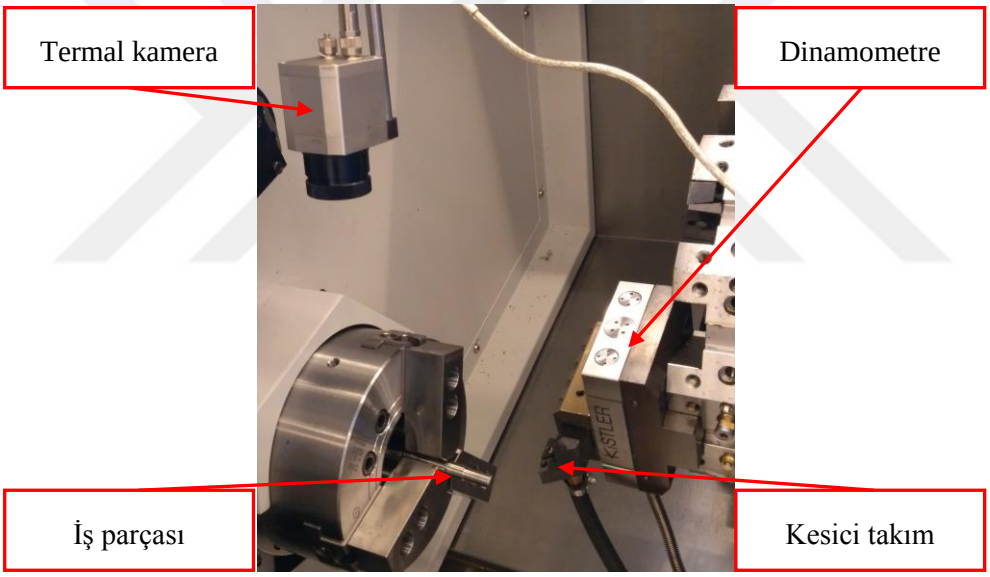
Azami Tornalama Çapı	390 mm
Azami Tornalama Boyu	562 mm
Azami Çubuk Sürme Çapı	65 mm
Ayna Ölçüsü	8 inç
İş mili Motor Gücü	18,5 kW
Azami İş mili Devri	4500 dev/dak
İş mili Torku	183.1 Nm
Güç Aktarma Metodu	Kayış Tip
Boştaki Eksen Hızları	X=24 m/dak, Z=30 m/dak
Takım Adedi	12
Dış Çap Takım Tutucusu	25×25 mm
Dış Çap Takım Tutucusu	40 mm
Boyutlar(Uzunluk-Genişlik-Yükseklik)	2.94x1.62x1.7 m

Talaş kaldırma deneylerinde kullanılan DNMG 110404-MF 1105 kesici ucun ve HDJNL 2525M 11HP takım tutucunun görüntüsü Şekil 2.6’ da sunulmuştur.



Şekil 2.6. Takım tutucu ve kesici ucun görüntüsü

Şekil 2.7' de testlerde kullanılan deney ve ölçüm düzeneği gösterilmektedir. Kesme kuvvetleri ve kesme sıcaklıkları ölçümü Bölüm 2.5 ve 2.6'da detaylı olarak tanıtılacaktır.

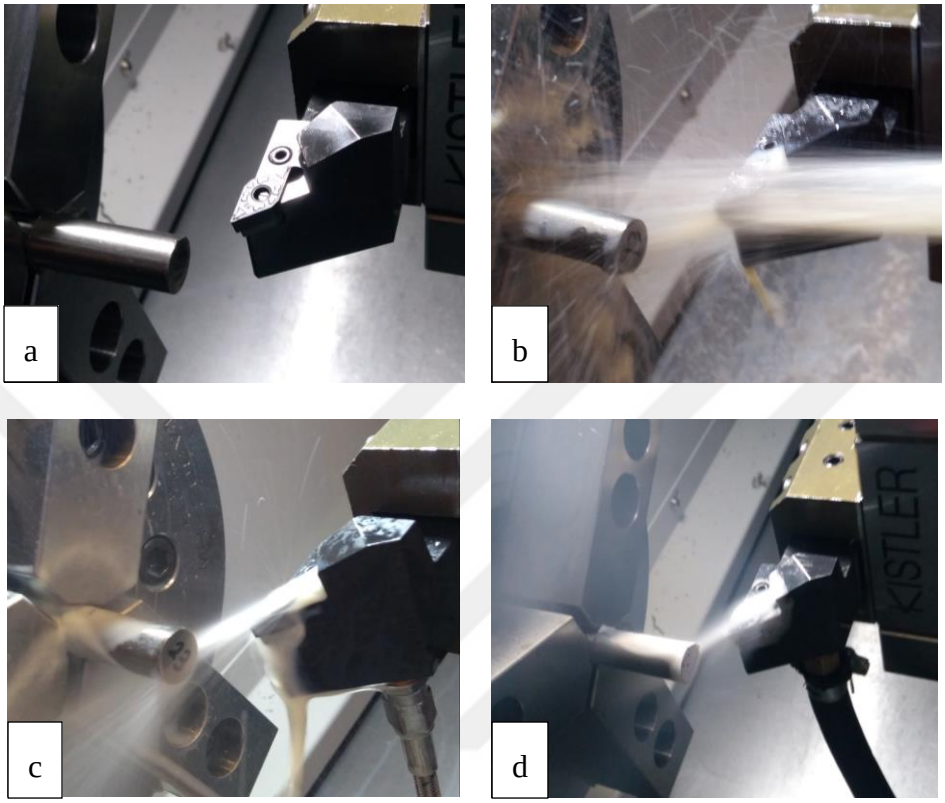


Şekil 2.7. Deney düzeneğinin gösterimi

2.3 Soğutucu ve Yağlayıcılar

Talaş kaldırma operasyonları soğutucu ve yağlayıcı kesme ortamlarında gerçekleştirilmiş olup elde edilen sonuçlar kuru kesme koşulu ile kıyaslanmıştır. Deneyler sırasında yağlayıcı koşul olarak %5 oranında sentetik yağ karışımına sahip kesme sıvısı 400 litre/saat debiyle, yüksek basınçlı soğutma (HPC) ise 50 Bar basınç ile kesme bölgesine kesici takımın talaş yüzeyinden uygulanmıştır. Soğutucu olarak ise sıvı karbondioksit (CO2) 45 bar basınç ile kriyojenik olarak kesme bölgesine kesici takımın talaş

yüzeyinden uygulanmıştır. Deneyler sırasında uygulanan soğutucu ve yağlayıcıların deneysel gösterimi Şekil 2.8' de sunulmuştur.



Şekil 2.8. Soğutucu/yağlayıcıların uygulanışı a)kuru kesme b)kesme sıvısı c)HPC d)CO_2

2.4 Kesme Parametleri

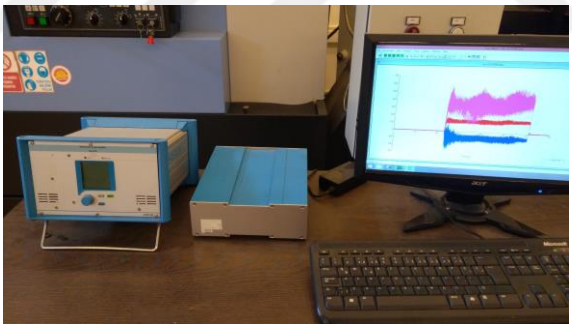
Şekil hafızalı NiTi alaşımın talaş kaldırma operasyonları farklı kesme koşulları ve değişik kesme hızları (V_c) ve ilerleme değerlerinde (f) gerçekleştirilmiş olup kesme derinliği(a_p) sabit olarak alınmıştır. Kesme parametreleri kesici takım firmalarının önerdiği değerler ve literatürde daha önce yapılmış çalışmalar dikkate alınarak bu değerlere yaklaşık değerler seçilmiş olup[29, 31, 40], yapılan deneyler sonucu elde edilen talaşlı imalat performansı ve yüzey bütünlüğü verileri bu parametreler ışığında değerlendirilmiştir. Yapılan talaş kaldırma operasyonlarında kullanılan parametreler Tablo 2.4' te sunulmuştur.

Tablo 2.4. Talaş kaldırma işleminin gerçekleştirildiği farklı soğutucu/yağlayıcı kesme koşulları ve değişik kesme parametreleri

Kesme Koşulları	Kuru, Kesme sıvısı, HPC, CO_2
Kesme hızı, V_c (m/dak)	20, 45, 70
İlerleme değeri, f (mm/dev)	0.08, 0.16
Kesme derinliği, a_p (mm)	0.6

2.5 Kesme Kuvvetleri Ölçümü

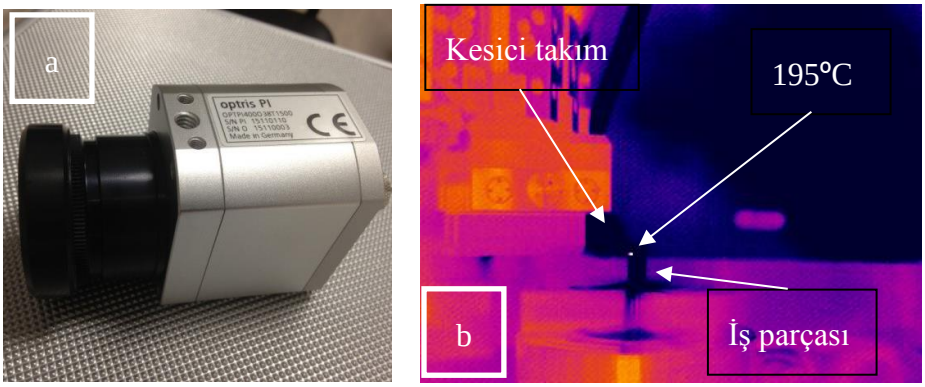
Talaş kaldırma deneyleri esnasında oluşan kesme kuvvetleri Kistler 2129AA dinamometre ile ölçülmüştür. Ölçümlerde kuvvet bileşenleri esas kesme kuvveti *Fc*, radyal kuvvet *Fr* ve ilerleme kuvveti *Fz* ayrı ayrı ölçülerek Dynoware yazılımı aracılığı ile ölçümler sayısal datalara dönüştürülmüş olup ölçüm düzeneği Şekil 2.9' da gösterilmiştir.



Şekil 2.9. Amplifikatör ve veri toplayıcı

2.6 Kesme Sıcaklıkları Ölçümü

Talaş kaldırma sürecinde sıcaklık ölçümleri ±2°C veya %±2 hassasiyetinde ve 382x288 piksel çözünürlükte Optris PI 400 infrared kamera ile yapılmıştır. Kamera ile -20-100, 0-250, 150-900 ve 200-1500 °C temel aralıklarında sıcaklık ölçümleri yapılabilmektedir. Ölçümler sırasında emissivite 0.21 alınmıştır [29]. Infrared kamera fotoğrafı, kameranın pozisyonlanması ve yazılımdan elde edilen görüntüler aşağıda Şekil 2.10'da gösterilmiştir.



Şekil 2.10. (a) Termal kamera (b) sıcaklık ölçümü

2.7 Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümü

İşlenmiş NiTi alaşımların yüzey pürüzlülüğü Mitutoyo marka SJ210 model yüzey pürüzlülük ölçme cihazı ile ölçülmüştür. Herbir işlenmiş numune beş farklı yerinden ölçülerek, bu beş ölçümün ortalaması alınıp pürüzlülük değerleri elde edilmiştir. Yüzey pürüzlülüğü ölçme cihazı Şekil 2.11' de gösterilmiştir.



Şekil 2.11. Yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazı

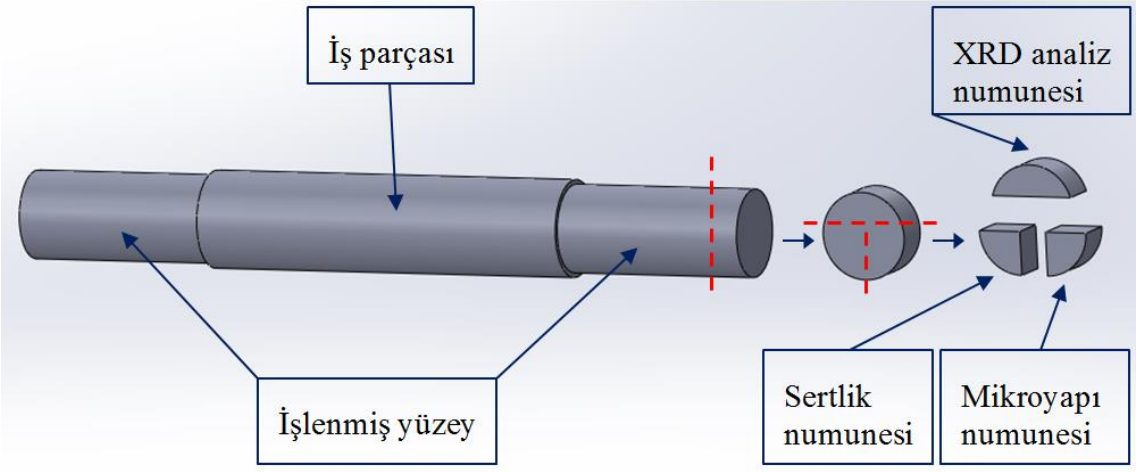
2.8 Yüzey Bütünlüğü Analiz Çalışmaları Kapsamında Yapılan Hazırlıklar

Şekil 2.12' de yüzey bütünlüğü analizi kapsamında yapılan işlemler özetle şematik olarak gösterilmiştir.

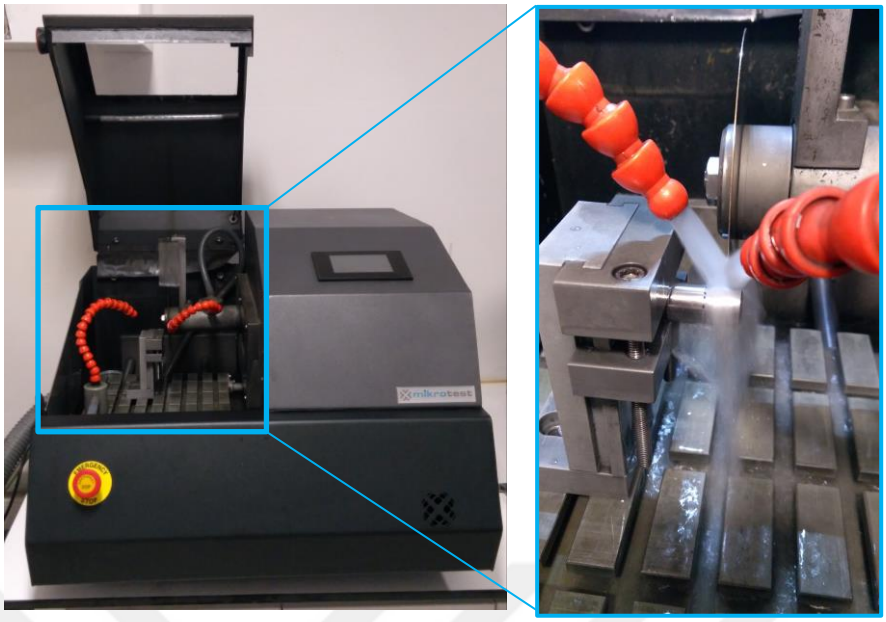


Şekil 2.12. Yüzey bütünlüğü analizinde izlenen yolun şematik gösterimi

Talaşlı imalat işlemi sonrası iş parçasının işlenmiş yüzey ve yüzeyaltında meydana gelen değişimlerin incelenmesi hususunda işlenmiş yüzeyden hassas kesme cihazı ile numune kesilmiş olup bu numuneden de farklı analizler için farklı kesitler alınmıştır. Alınan kesitler ayrıntılı olarak Şekil 2.13' te, hassas kesme cihazı ise Şekil 2.14' te gösterilmiştir.

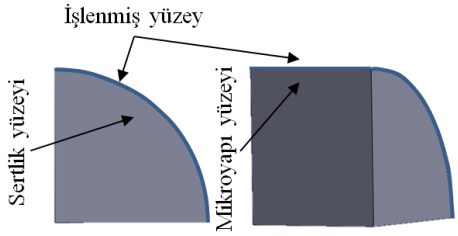


Şekil 2.13. Metalografik analiz için iş parçasından alınan kesitlerin gösterilişi



Şekil 2.14. İşlenmiş NiTi iş parçasından yüzey bütünlüğü analizi için alınan kesit numunenin kesildiği hasas kesme cihazı

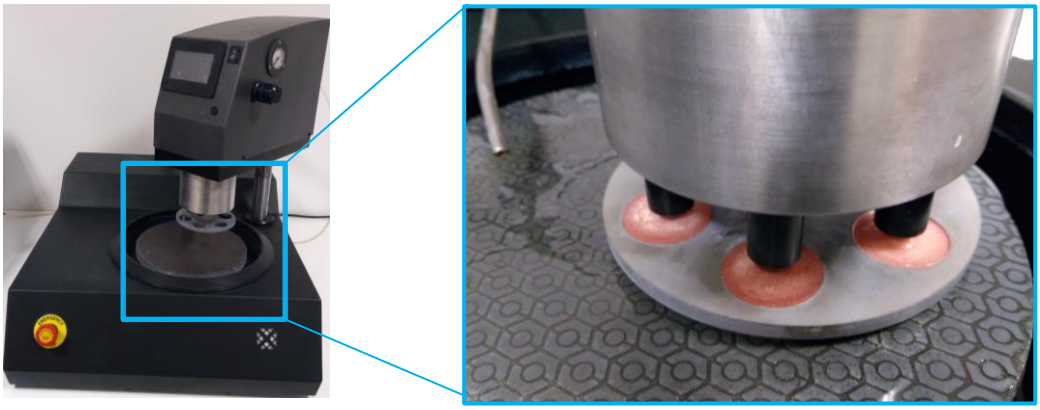
Hasas kesme cihazında kesilen numunelerin mikroyapı, mikrosertlik ve XRD analizleri için farklı kısımları incelenmiştir. Bu kısımlar Şekil 2.15'te ayrıntılı olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.15. Mikroyapı analizleri için hazırlanan numunedeki incelenen yüzey

Yüzey bütünlüğü analizi için hassas kesme cihazında kesilen numuneler 2 birim toz + 1 birim sıvı sertleştirici oranında hazırlanan akrilik çözelti içerisinde soğuk kalıplama yöntemiyle bakalit alınmıştır. Bakalit alınan numuneler daha sonra metalografik analizler için hazırlama aşamasında ilk olrak zımparalama cihazında sırasıyla 60, 30 ve 15 µm gritteki manyetik disklerle zımparalanmıştır. Bakalit alınan numunelerin zımparalama işlemi 250 rpm devir ve 300 N yük uygulayabilen zımparalama/parlatma cihazında yapılmış olup, cihaz Şekil 2.16' da gösterilmiştir. Zımparalama işlemi sonrası numuneler

zımparalama/parlatma cihazında manyetik parlatma keçesi ile 50 nm boyutunda elmas partiküllü parlatma solüsyonu kullanılarak parlatılmıştır.



Şekil 2.16. Multipol Advanced Plus Zımparalama ve Parlatma Cihazı

2.9 Sertlik Ölçümü

İşlenmiş malzemenin yüzeyinden derinlere inildikçe meydana gelen sertlik değerlerindeki değişimleri gözlemlemek için parlatılan sertlik numunelerine Future-Tech FM310e model mikrosertlik cihazı ile numuneye iki farklı yerinden 50 *gf* yük uygulanıp dört defa ölçüm yaptıktan sonra elde edilen Vickers(HV) sertlik değerlerinin ortalaması alınmıştır. Sertlik ölçme cihazı Şekil 2.17'de gösterilmiştir.



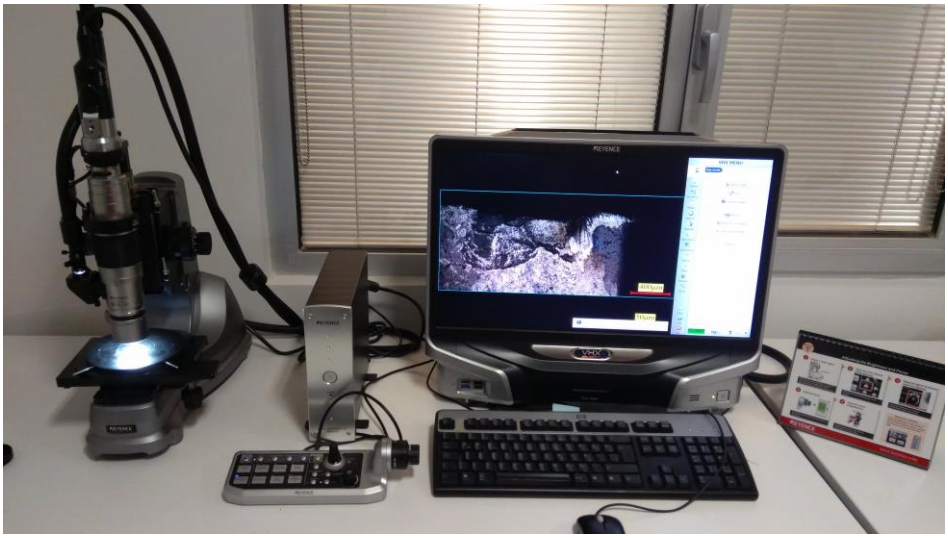
Şekil 2.17. Future-Tech sertlik ölçme cihazı

2.10 Mikroyapı Görüntüleme

İşlenmiş numunenin yüzey bölgelerinde mikroyapısında meydana gelen değişimlerin incelenmesi için Şekil 2.18' de gösterilen çeker ocakta %3.2 HF + %14.6 HNO3 + 82.2 H2O oranında hazırlanan dağlama solüsyonu hazırlanmıştır [30]. Parlatılan numuneler hazırlanan solüsyonun içerisinde daldırma yöntemiyle dağlanarak mikroyapı görüntüleri Şekil 2.19' da gösterilen Keyence VHX 6000 dijital mikroskop ile elde edilmiştir. Dijital optik mikroskop 250x-2500x büyütme aralığı, birden çok görüntüyü birleştirme(stitching), 3D görüntü alma, görüntü alma sırasında otomatik odaklanma, yüzey topoğrafisi alma özelliklerine sahiptir.



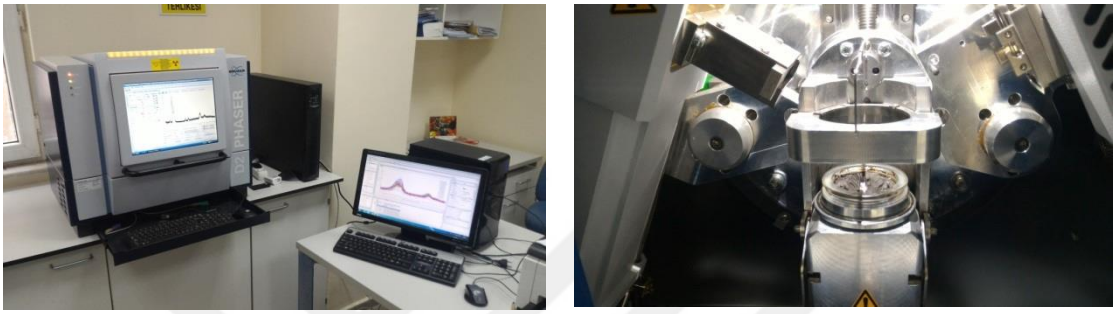
Şekil 2.18. Dağlama sırasında zararlı gazların tahliyesi için gerekli çeker ocak



Şekil 2.19. Mikroyapı görüntülerinin alındığı dijital optik mikroskop

2.11 XRD Faz Analizi Ölçümü

X-ışını difraksiyonu (XRD) ölçümleri için Bruker AXS Marka D2 Phaser cihazı kullanılmıştır (Şekil 2.20). Faz analizi kapsamında gerçekleştirilen XRD ölçümlerinde 1,54060 *A* dalga boyuna sahip CuKα katot kullanılmış, akım ve voltaj değeri sırasıyla 10mA ve 30kv olarak seçilmiştir.2 Theta ölçüm aralığı literatür dikkate alınarak [41] 30-90° seçilmiştir. Ölçümler işlenmiş parçaların işlenen yüzeylerinden yapılmıştır.



Şekil 2.20. XRD ölçüm sistemi ve ölçülen numunelere ait görüntü

3. ÖN ÇALIŞMA SONUÇLARI

Literatürde Kaynak ve arkadaşları[30] tarafından yapılan, kuru, MQL ve LN_2 koşullarında NiTi alaşımın işlenmensinin kesici takım aşınmalarına etkisinin incelendiği çalışmanın devamı niteliğinde olup, bu tezin ilerleyişine yol göstermesi açısından ön çalışmalar yapılmıştır. Ön çalışmada kesme koşullarının, işlenmiş NiTi alaşım malzemesinin yüzey kalitesine etkileri incelenmiş, takım aşınmasına bağlı olarak yüzey kalitesinin bozulduğu anlaşılmıştır. Ayrıca kuru ve MQL koşullarında takım aşınmasının LN_2 ye göre daha fazla olduğu ancak LN_2 de de gözardı edilmeyecek seviyede olduğu anlaşılmıştır.

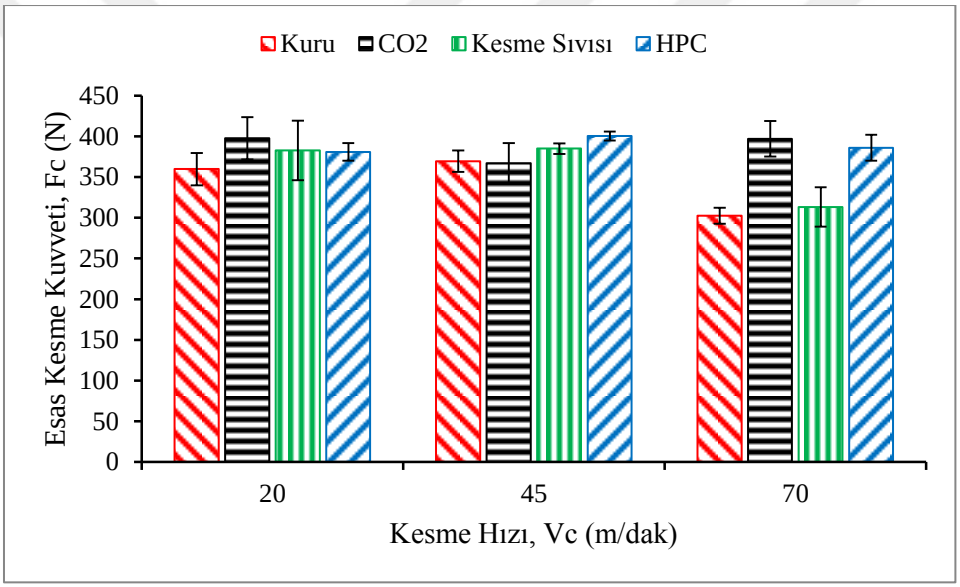
Elde edilen bulgular kayda değer nitelikte veriler olup, bu çalışma Eskişehir/Türkiye'de düzenlenen "Uluslararası Makine Tasarım ve İmalat Kongresi (UMTİK 2018)" nde sözlü bildiri olarak "Şekil Hafızalı NiTi Alaşımın Kuru, MQL ve Kriyojenik Koşullarda İşlenmesinde Kesici Takım Aşınmasıyla İş Parçası Yüzey Kalitesi Arasındaki İlişkinin Araştırılması" başlığıyla yayına dönüştürülmüştür.

Bu bulgular doğrultusunda bu tez çalışmasında ise, daha önce yapılmamış bir çalışma olarak ısıl işlem uygulanmış NiTi alaşımın ilk defa yüzey bütünlüğü karakteristiklerinin incelenmesi ve daha iyi bir işleme performansı elde edebilmek amacıyla farklı bir kesici takım kullanılmıştır. Ayrıca, NiTi alaşım malzemesinin işlenmesinde daha önce kullanılmayan HPC ve CO_2 gibi koşulların yanısıra, kesme sıvısı ve kuru kesme koşullarında, farklı kesme parametrelerinde deneyler yapılmış ve sonuçlar değerlendirilmiştir.

4. ASIL DENEYLERİN BULGULARI VE TARTIŞMA

4.1 Kesme Kuvvetleri

İşleme performansını en iyi anlamanın yollarından biri kesme kuvvetlerini incelemektir. Genellikle yapılan talaş kaldırma deneylerinde, takım aşınması, iş parçasının yüzey pürüzlülüğünün ölçülmesi gibi işlemler dolayısıyla talaş kaldırma operasyonu yarıda kesilir ve ölçümlerden sonra deneylere devam edilir. Bu durum genelde zaman kaybı olarak nitelendirilir. Bu nedenle, talaşlı imalat sırasında ölçülmesi kolay olan parametreleri elde ettikten sonra, uzmanlar, elde edilen parametrelerle nispeten hesaplanması zor olan parametreleri ilişkilendirerek tahminler yapabilirler [29, 42, 43].

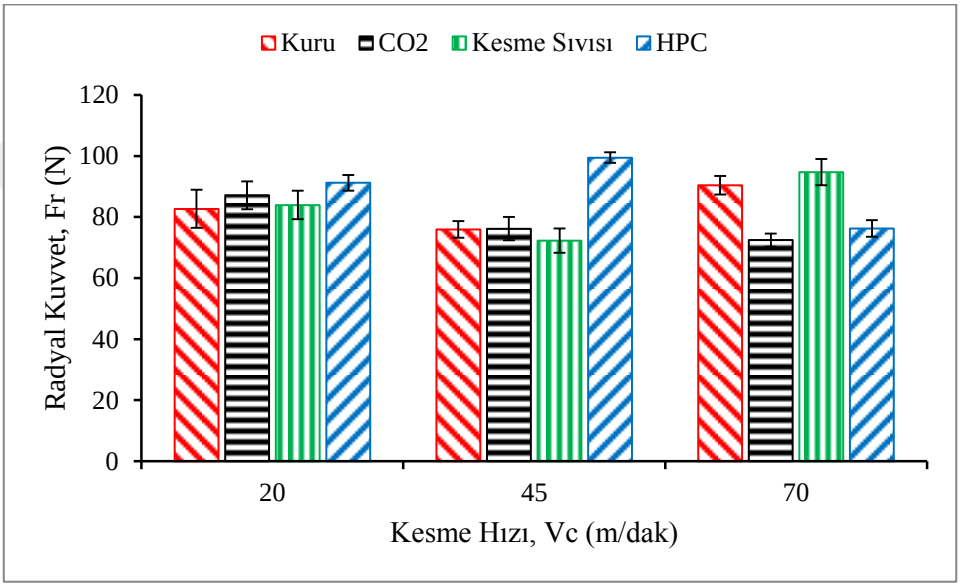


Şekil 4.1. Farklı kesme koşulları ve kesme hızlarında yapılan talaş kaldırma operasyonlarında oluşan esas kesme kuvvetleri (f=0.08 mm/dev)

Farklı soğutucu ve yağlayıcı koşullarında yapılan talaş kaldırma deneylerinde ölçülen esas kesme kuvvetleri kesme hızına bağlı olarak Şekil 4.1' de sunulmuştur. Şekilde görüleceği üzere kesme kuvvetlerinde, kesme hızının artışıyla beraber kesin eğilim söz konusu olamamıştır. Bununla birlikte kuru kesme ve kesme sıvısı koşullarında 20 m/dak kesme hızına kıyasla 70 m/dak kesme hızında esas kesme kuvvetlerinde belirgin bir azalma eğilimi mevcuttur. Kuru kesme ve kesme sıvısı koşullarında kesme sıcaklığının etkisiyle termal etkiler dominant etki yapmış iken, CO_2 ve HPC koşullarında ise soğutucu etki nedeniyle termal yumuşama olayı zayıf kalmıştır. Kuru kesme koşulunda

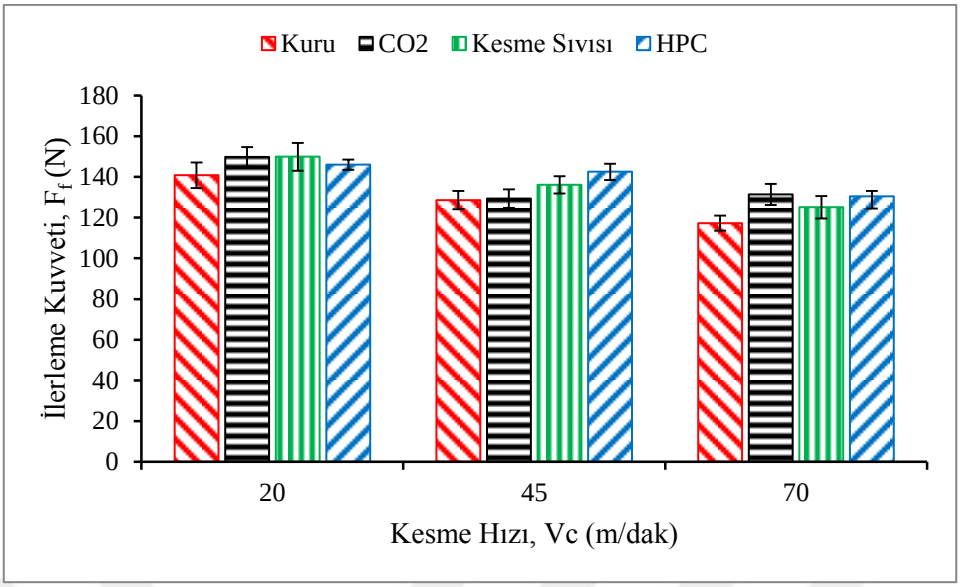
kesme hızının 20 m/dak dan 70 m/dak ya artmasıyla beraber esas kesme kuvvetinde % 16 kadar azalma olmuşken, kesme sıvısı koşulunda ise bu azalma oranı % 18 olarak gerçekleşmiştir.

Şekil 4.2' de farklı kesme koşulları ve kesme hızlarında yapılan talaş kaldırma operasyonlarında ölçülen radyal kuvvetler sunulmuştur. Kesme hızının artmasına bağlı olarak kesme koşulları arasında belirgin bir eğilim söz konusu olmamıştır.



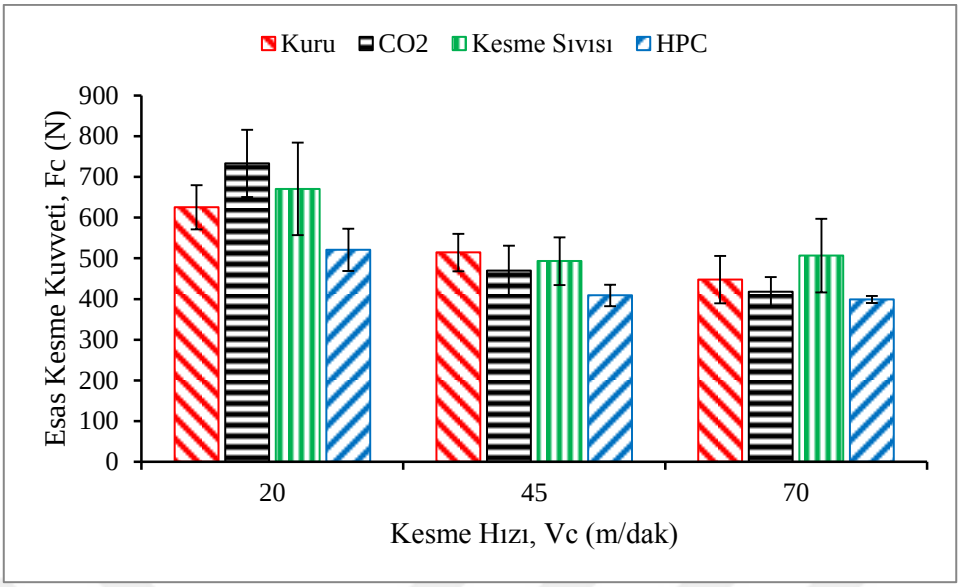
Şekil 4.2. Farklı kesme koşulları ve kesme hızlarında yapılan talaş kaldırma operasyonlarında oluşan radyal kuvvetler (f=0.08 mm/dev)

Şekil 4.3' te farklı kesme koşulları ve kesme hızlarında yapılan talaş kaldırma operasyonlarında ölçülen ilerleme kuvvetleri sunulmuştur. Şekle genel olarak bakıldığında kesme hızının artmasıyla tüm kesme koşullarında ilerleme kuvvetlerinde azalma eğilimi mevcuttur. 20 m/dak kesme hızında ölçülen radyal kuvvetlerle 70 m/dak kesme hızında ölçülen radyal kuvvetler arasında sırasıyla kuru kesme de %17, kesme sıvısında % 16, CO_2 de %12 ve HPC koşulunda %11 azalma söz konusudur.



Şekil 4.3. Farklı kesme koşulları ve kesme hızlarında yapılan talaş kaldırma operasyonlarında oluşan ilerleme kuvvetleri (f=0.08 mm/dev)

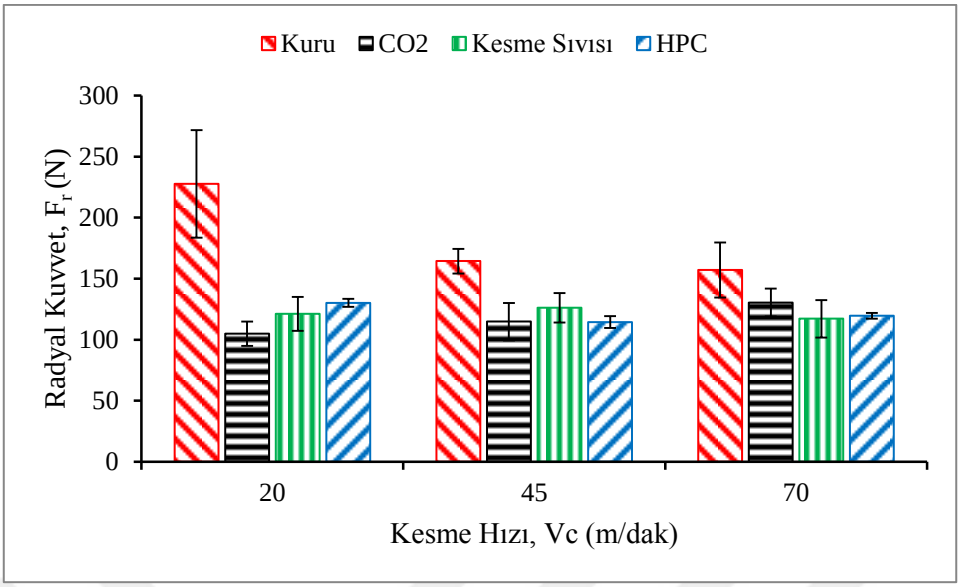
0.16 mm/dev ilerleme değerinde kesme koşuluna ve kesme hızına bağlı olarak oluşturulan esas kesme kuvveti değerleri Şekil 4.4' te sunulmuştur. Görüleceği üzere 0.08 mm/dev ilerleme değerinde olduğu gibi, kesme hızının artmasıyla beraber tüm kesme koşullarında esas kesme kuvvetlerinde düşüşler meydana gelmiştir. 20 m/dak kesme hıznada en yüksek kesme kuvveti CO_2 koşulunda yaklaşık 733 N olarak ölçülmüş olup, en düşük değer ise HPC koşulunda 520 N olarak ölçülmüştür. Kesme hızının 70 m/dak olmasıyla beraber tüm kesme koşullarında 20 m/dak kesme hızına göre meydana gelen azalmalar kuru kesmede %28, CO_2 de %43, kesme sıvısında %24 ve HPC koşulunda %23 olarak ölçülmüştür.



Şekil 4.4. Farklı kesme koşulları ve kesme hızlarında yapılan talaş kaldırma operasyonlarında oluşan esas kesme kuvvetleri (f=0.16 mm/dev)

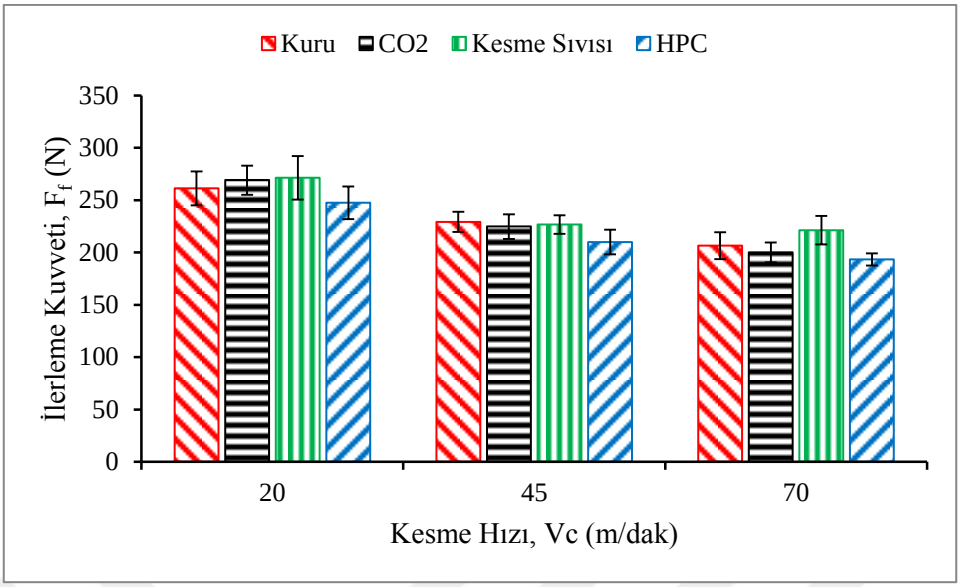
Şekil 4.5' te 0.16 mm/dev ilerleme değerinde ölçülen radyal kuvvetler sunulmuştur. Görüldüğü üzere tüm kesme hızlarında en yüksek radyal kuvvet kuru kesme koşulunda oluşmuştur. Radyal kuvveti kesici takımın burun bölgesindeki aşınma etkilemektedir [44]. Aşınma değerlerine bakıldığında da en yüksek burun aşınma değeri de kuru kesme koşulunda olduğu için radyal kuvvet sonuçlarını destekler nitelikte olmuştur.

20 m/dak kesme hızında kuru kesme de ölçülen radyal kuvvet değeri 227 N ile en yüksek olup, en düşük ise 104 N ile CO_2 koşulunda ölçülmüştür. 70 m/dak kesme hızında ise en yüksek radyal kuvvet kuru kesme koşulunda 157 N olarak ölçülmüş olup, en düşük kuvvet ise 117 N olarak kesme sıvısı koşuluna aittir.



Şekil 4.5. Farklı kesme koşulları ve kesme hızlarında yapılan talaş kaldırma operasyonlarında oluşan radyal kuvvetler (f=0.16 mm/dev)

İlerleme değerinin 0.16 mm/dev olduğu durumda yapılan deneylerde ölçülen ilerleme kuvveti değerleri kesme hızına ve kesme koşullarına bağlı olarak Şekil 4.6' da sunulmuştur. Genel olarak bakıldığında, kesme hızının artmasıyla tüm kesme koşullarında ilerleme kuvvetlerinde azalma eğilimi vardır. 20 m/dak kesme hızında ölçülen ilerleme kuvvetleri sırasıyla kuru kesmede 261 N, CO_2 de 269 N, kesme sıvısında 271 N ve HPC de 247 N olarak ölçülmüştür. Kesme hızının 70 m/dak olmasıyla beraber 20 m/dak kesme hızına göre ilerleme kuvvetlerinde meydana gelen azalma oranları sırasıyla kuru kesmede %21, CO_2 de %25, kesme sıvısında %18 ve HPC koşuluda ise %22 olarak gerçekleşmiştir.



Şekil 4.6. Farklı kesme koşulları ve kesme hızlarında yapılan talaş kaldırma operasyonlarında oluşan ilerleme kuvvetleri (f=0.16 mm/dev)

4.2 Kesme Sıcaklığı

Talaşlı imalat operasyonu sırasında oluşan ısı kesme performansı açısından olumsuz bir parametre olarak karşımıza çıkmaktadır. Oluşan bu ısı kesme parametreleri ile bir miktar azaltılsa da tam olarak ısının oluşmasını engellemek mümkün olmamaktadır. Isının büyük bir kısmı birincil deformasyon bölgesinde plastik deformasyondan dolayı oluşurken, diğer büyük bölümü ise kesici takım ile talaş yüzeyinde meydana gelen sürtünmeden kaynaklanmaktadır.

Kesme bölgesinde meydana gelen ısının bir kısmı kesici takıma nüfus eder ve ısıl gerilmelere neden olarak kesici takım aşınmasını etkilemektedir. Kesme bölgesinde oluşan sıcaklık, termal kamera yardımı ile ölçülmüş ve ortalama değerleri alınmıştır. Kesme koşuluna ve kesme hızına bağlı olarak sıcaklık değerleri oluşturulmuş ve Şekil 4.7' de sunulmuştur. Şekil genel olarak kesme hızı açısından incelendiğinde tüm kesme koşulları için kesme hızı arttıkça sıcaklık değerleri de artmıştır. Bu durum kesme hızının artması ile artan sürtünme kuvveti ve deformasyon bölgelerindeki artan gerilme ile açıklanabilir [45].

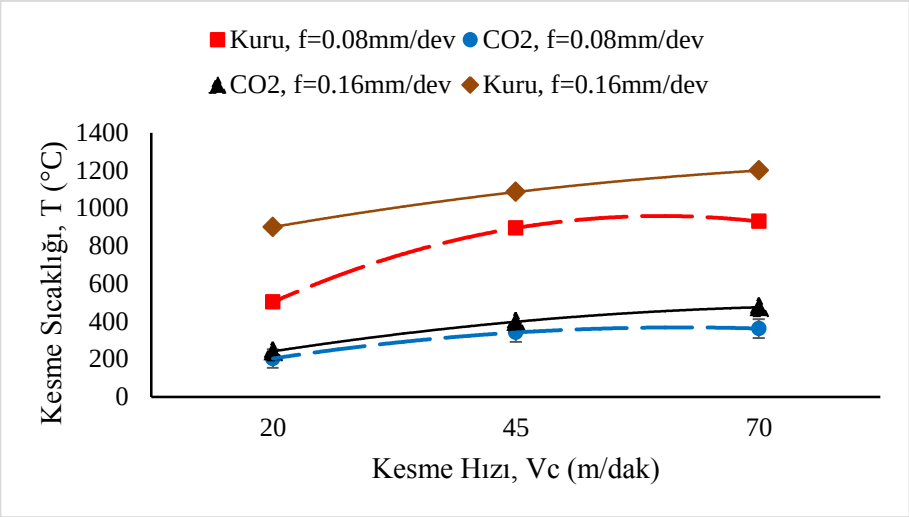
İlerlemenin 0.08 mm/dev olduğu durumda ve kesme hızının da 20 m/dak dan 70 m/dak ya doğru artması ile kuru kesme koşulunda oluşan sıcaklık değerlerinde yaklaşık olarak %85 artış görülmüştür. Aynı durum karbondioksit yardımlı soğutma koşulunda da

görülmüş ve %78 oranında artış olmuştur. İlerlemenin 0.16 mm/dev olduğu durumda ise kuru kesme koşulundaki artış miktarı yaklaşık olarak %33 olmuştur. Karbondioksit yardımlı soğutma koşulunda ise %97 olmuştur. Karbondioksit yardımlı soğutma koşulunda artış oranının yüksek olmasının sebebi düşük kesme hızında karbondioksitin daha efektif bir soğutma sağlamasıdır.

20 m/dak kesme hızında ve 0.08 mm/dev ilerlemede kuru kesme koşulunda 502 °C ortalama sıcaklık oluşurken, karbondioksit yardımlı soğutma koşulunda 203 °C sıcaklık oluşmuştur. Böylece karbondioksit yardımlı soğutma koşulu kuru kesme koşulundan yaklaşık olarak 59% daha az sıcaklık oluşmasına neden olmuştur. 70 m/dak kesme hızında ise kuru kesme koşulunda ortalama sıcaklık değeri 930 °C iken karbondioksit yardımlı soğutma koşulunda 362 °C olmuştur. Bu durumda ise karbondioksit yardımlı soğutma koşulu kuru kesme koşulundan yaklaşık olarak %61 daha az sıcaklık oluşturmuştur.

İlerlemenin 0.16 mm/dev olduğu durumda ise 20 m/dak kesme hızında kuru kesme koşulunda 900 °C sıcaklık meydana gelirken, karbondioksit yardımlı soğutma koşulunda 241 °C ortalama kesme sıcaklığı meydana gelmiştir. Görüldüğü üzere karbondioksit yardımlı soğutma koşulu kuru kesme koşulundan yaklaşık olarak %73 daha az sıcaklık oluşturmuştur. Kesme hızı 70 m/dak iken kuru kesme koşulunda 1200 °C sıcaklık oluşmuştur. Karbondioksit yardımlı soğutma koşulunda bu değer 475 °C olmuş ve kuru kesme koşulundan %60 daha az ısı oluşturmuştur.

Genel olarak bakıldığında kesme sıcaklıklarında karbondioksit yardımlı soğutma koşulu ciddi oranda düşüş sağlamıştır. Kesme hızında değişikliğe sebep olan bir diğer etken ise ilerleme olmuştur. İlerlemenin 0.08 den 0.16 mm/dev e artması ile sıcaklık değerlerinde artış gözlemlenmiştir. 20 m/dak kesme hızında kuru kesme koşulunda ilerlemenin artması ile sıcaklıkta meydana gelen artış %79 olmuştur. Bu durum karbondioksit yardımlı soğutma koşulunda %18 olarak karşımıza çıkmıştır. En yüksek kesme hızı olan 70 m/dak kesme hızında ise kuru kesme koşulundaki artış %29 iken karbondioksit yardımlı soğutma koşulunda bu artış %31 olmuştur. İlerlemenin artması ile artan sıcaklık değerleri artan temas alanı ve artan sürtünme kuvveti ile açıklanabilir [45-47].

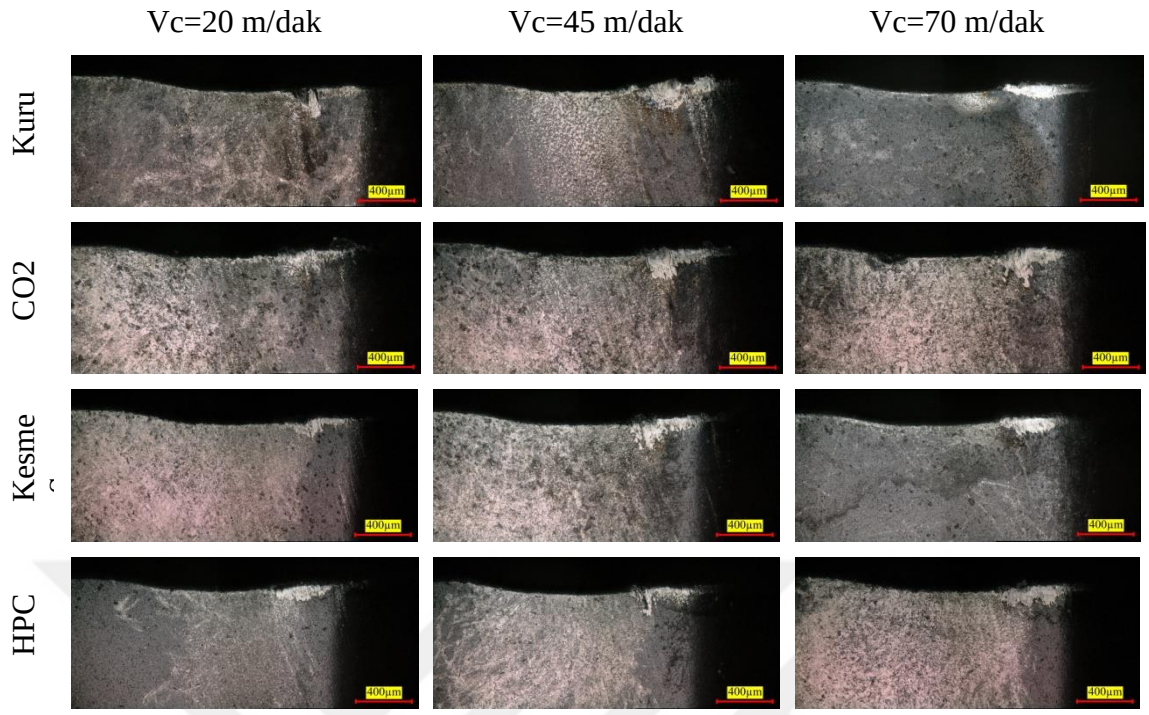


Şekil 4.7. Kuru ve CO2 koşulunda yapılan talaş kaldırma operasyonları sırasında kesme hızına bağlı olarak ölçülen kesme sıcaklıkları

4.3 Serbest Yüzey Aşınması

Talaş kaldırma operasyonlarında kesici takımlarda oluşan aşınmalar, talaşlı imalat performansı üzerinde belirleyici bir role sahiptir. Talaş kaldırma operasyonu esnasında kesici takımın geometrisinde bir takım değişiklikler meydana gelmektedir. Bu durum kesici takım aşınması olarak karşımıza çıkar ve talaşlı imalat performansını olumsuz yönde etkilemektedir. Dolayısı ile kesici takım aşınma analizinin iyi yapılması ve kesici takımın ömrünü ne zaman doldurduğu konusunda iyi analiz yapılması gerekmektedir. Kesici takım ömrünün belirlenmesi hususunda ISO bir standart belirlemiş olup sınırın geçilmesi durumunda kesici takımın ömrünü tamamladığını belirtmiştir. Bu ömür tayini kesici takımın serbest yüzeyindeki aşınma miktarına bağlıdır. Yapılan talaş kaldırma operasyonu finiş ise 0.3 mm kaba talaş kaldırma operasyonu ise 0.7 mm olarak belirtilmiştir [48]. Yapılan deysel çalışmalarda kesici takım aşınmaları dijital optik mikroskop yardımı ile analiz edilmiş ve aşınma değerleri alınmıştır.

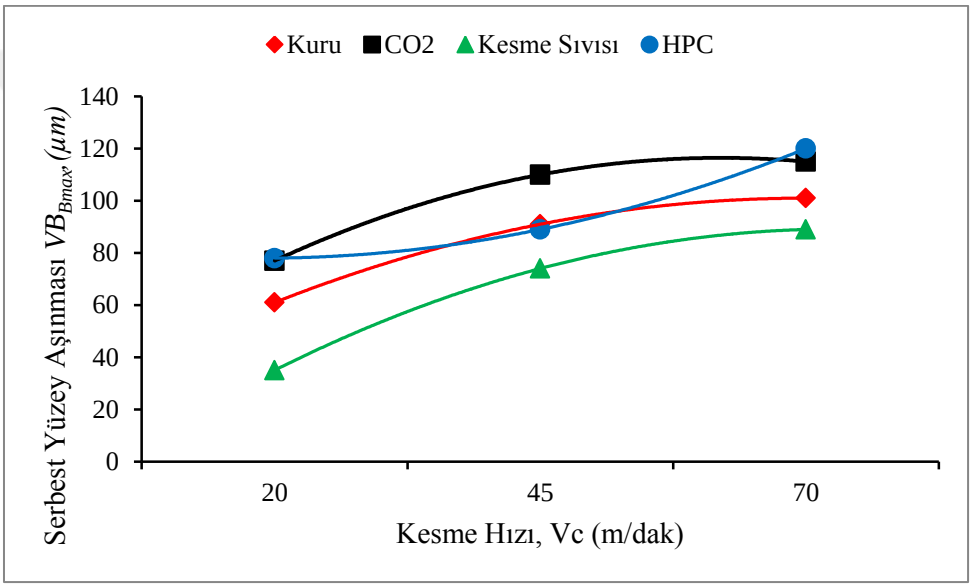
Çalışma kapsamında yapılan deneyler sonrasında kesici takımda meydana gelen serbest yüzey aşınma görüntüleri Şekil 4.8’ de kesme koşuluna ve kesme hızına bağlı olarak sunulmuştur. Şekil genel olarak incelendiğinde kesme hızının artması ile kesici takım serbest yüzey aşınmalarında artış gözlemlenmiştir. Kesme hızına bağlı olarak artan aşınma miktarları, kesme hızı arttıkça artan gerilme ve artan sürtünme kuvvetlerine bağlıdır [49].



Şekil 4.8. Farklı kesme koşulları ve kesme hızlarında yapılan talaş kaldırma operasyonlarında oluşan serbest yüzey aşınma görüntüleri (f=0.08 mm/dev)

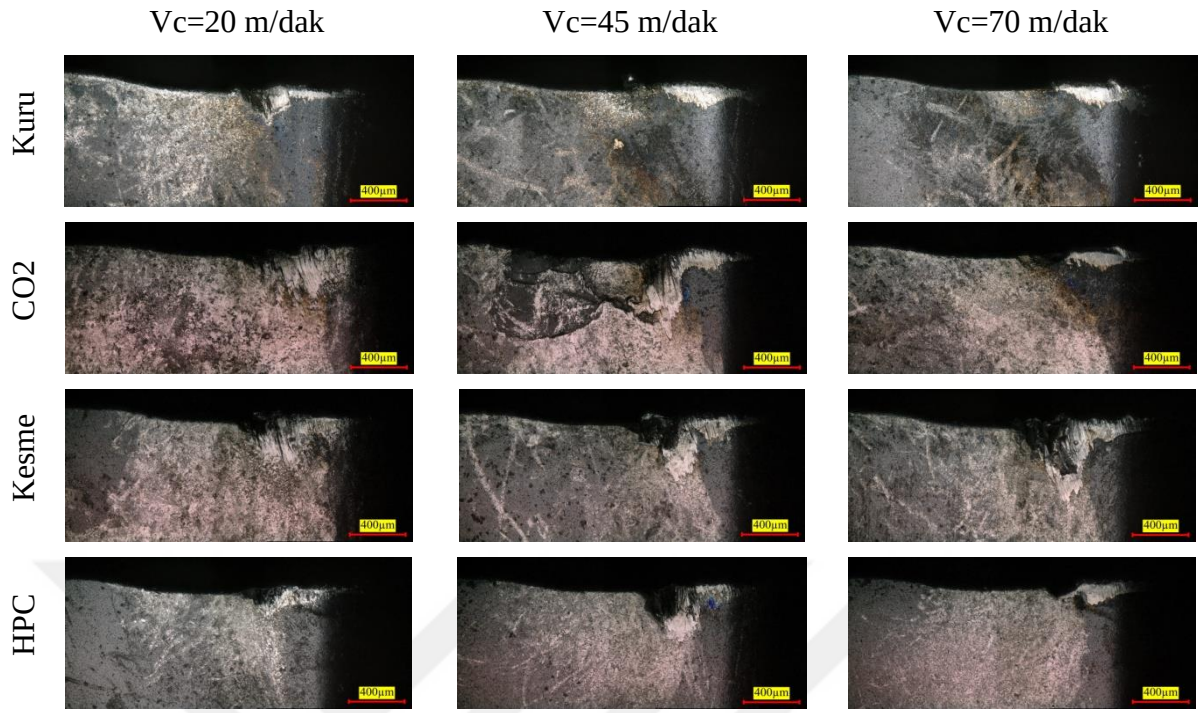
Kesici takım serbest yüzeyinden alınan aşınma değerleri Şekil 4.9' da kesme koşuluna ve kesme hızına bağlı olarak sunulmuştur. Şekil kesme hızı açısından incelendiğinde tüm kesme koşullarında kesme hızının artması ile aşınma miktarlarında artış görülmüştür. 20m/dak kesme hızında en düşük aşınma değeri kesme sıvısı koşulunda 35µm olmuştur. Kuru kesme koşulunda ise 61 µm lik bir serbest yüzey aşınma değeri ölçülmüştür. Görüldüğü üzere kesme sıvısı ile soğutma koşulunda kuru kesme koşuluna göre %42 daha az serbest yüzey aşınması meydana gelmiştir. Yüksek basınçlı soğutma koşulu ile karbondioksit yardımlı soğutma koşulu birbirine çok yakın değerler oluşturmuş(78-77 µm) ve kuru kesme koşulundan yaklaşık olarak %27 daha fazla olmuştur. En yüksek kesme hızı olan 70 m/dak kesme hızındaki en az aşınma miktarı kesme sıvısı koşulunda 89 µm olmuştur. En yüksek aşınma değeri ise yüksek basınçlı soğutma koşulunda 120 µm olmuştur. Görüldüğü üzere tüm kesme hızlarında en düşük aşınma miktarı kesme sıvısı koşulunda olmuştur. Bu durum kesme sıvısının sürtünme katsayısını azaltması ile açıklanabilir. Yüksek basınçlı soğutma koşulunda aşınma değerlerinin yüksek çıkmasının nedeni ise takım talaş temas alanını azaltması ve kuvvetlerin daha küçük bir alana etki etmesinden kaynaklanmaktadır.

Kesme hızının 30 dan 70 m/dak ya artması ile kesme sıvısı koşulundaki serbest yüzey aşınma değerleri %154 oranında artmıştır. Karbondioksit yardımlı soğutma koşulunda kesme hızına bağlı artış oranı %49 olmuştur. Kuru kesme koşulunda ise kesme hızının artması ile serbest yüzey aşınma değerleri yaklaşık olarak %65 oranında artış göstermiştir. Kesme hızının artması ile yüksek basınçlı soğutma koşulunda gözlemlenen artış oranı %56 olmuştur. Görüldüğü üzere kesme hızının artışı ile kesici takımlarda aşınma miktarları tüm koşullar için artış göstermiştir. Bu durum kesme hızının artışı ile artan sıcaklık ve buna bağlı olarak artan sürtünme kuvvetleri ile açıklanabilir.



Şekil 4.9. Farklı kesme koşulları ve kesme hızlarında yapılan talaş kaldırma operasyonlarında oluşan serbest yüzey aşınma değerleri (f=0.08 mm/dev)

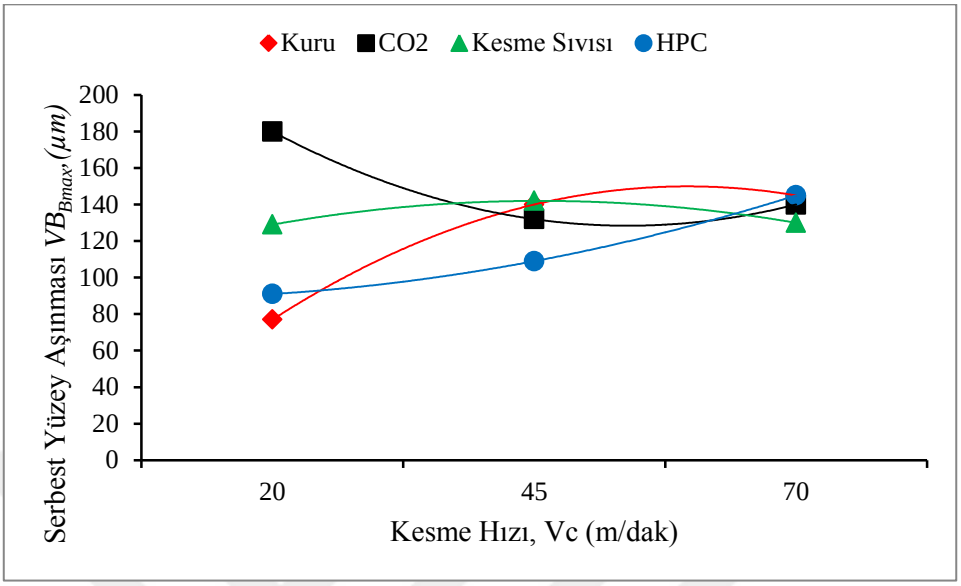
Şekil 4.10' da 0.16 mm/dev ilerlemede yapılan test sonuçlarında meydana gelen aşınma görüntüleri kesme hızına ve kesme koşuluna bağlı olarak sunulmuştur. Şekil incelendiğinde özellikle düşük kesme hızı olan 20 m/dak kesme hızında aşınma miktarları kesme koşulları arasında farklılık göstermiştir. 0.08 mm/dev ilerleme ile yapılan deneylere kıyasla aşınma miktarlarının daha fazla olduğu görülmektedir. Bu durum ilerlemenin artışı ile artan kuvvet ve kesme sıcaklıkları ile ilişkilidir. Öyle ki ilerlemenin artışı ile kesici takım temas alanı artar, dolayısı ile sürtünme kuvvetleri artar ve daha fazla talaş kaldırma oranı elde edilmiş olur. Bu sebepten dolayı aşınma miktarları ilerlemenin artması ile etkilenmiş ve artış göstermiştir.



Şekil 4.10. Farklı kesme koşulları ve kesme hızlarında yapılan talaş kaldırma operasyonlarında oluşan serbest yüzey aşınma görüntüleri (f=0.16 mm/dev)

Çalışma kapsamında yapılan testlerde 0.16 mm/dev ilerleme sonucunda oluşan serbest yüzey aşınma değerleri Şekil 4.11' de sunulmuştur. Şekil kesme koşulları ve kesme hızına bağlı olarak oluşturulmuştur. 20 m/dak kesme hızında en az aşınma miktarı kuru kesme koşulunda olmuştur. Bu değer 77 µm olarak ölçülmüştür. En fazla aşınma ise karbondioksit yardımlı soğutma koşulunda 180 µm değerinde oluşmuştur. Karbondioksit yardımlı soğutma koşulunda oluşan aşınma miktarı kuru kesme koşulundan yaklaşık olarak %134 oranında daha fazla olmuştur. Bunun sebebi karbondioksitin düşük kesme hızında daha iyi soğutma sağlaması ve termal yumuşamayı önlemesi ile açıklanabilir. Kuru kesme, kesme sıvısı ve yüksek basınçlı soğutma koşulunda kesme hızının artması ile aşınma değerleri artış gösterirken, karbondioksit yardımlı soğutma koşuluna serbest yüzey aşınma değerlerinde azalma eğilimi gözlemlenmiştir. Kesme hızının artması ile artan sıcaklıkla karbondioksit yardımlı soğutma koşulunun ısıya etkisin azalması ve termal yumuşamanın etkisinin artması ile açıklanabilir. Bu durumda kesme hızının 20 den 70 m/dak ya artması ile karbondioksit yardımlı soğutma koşulunda aşınma değerleri yaklaşık olarak %19 oranında azalmıştır. Kuru kesme koşulunda ise kesme hızının artması ile %88 oranında serbest yüzey aşınma değerleri azalmıştır. Kesme sıvısı

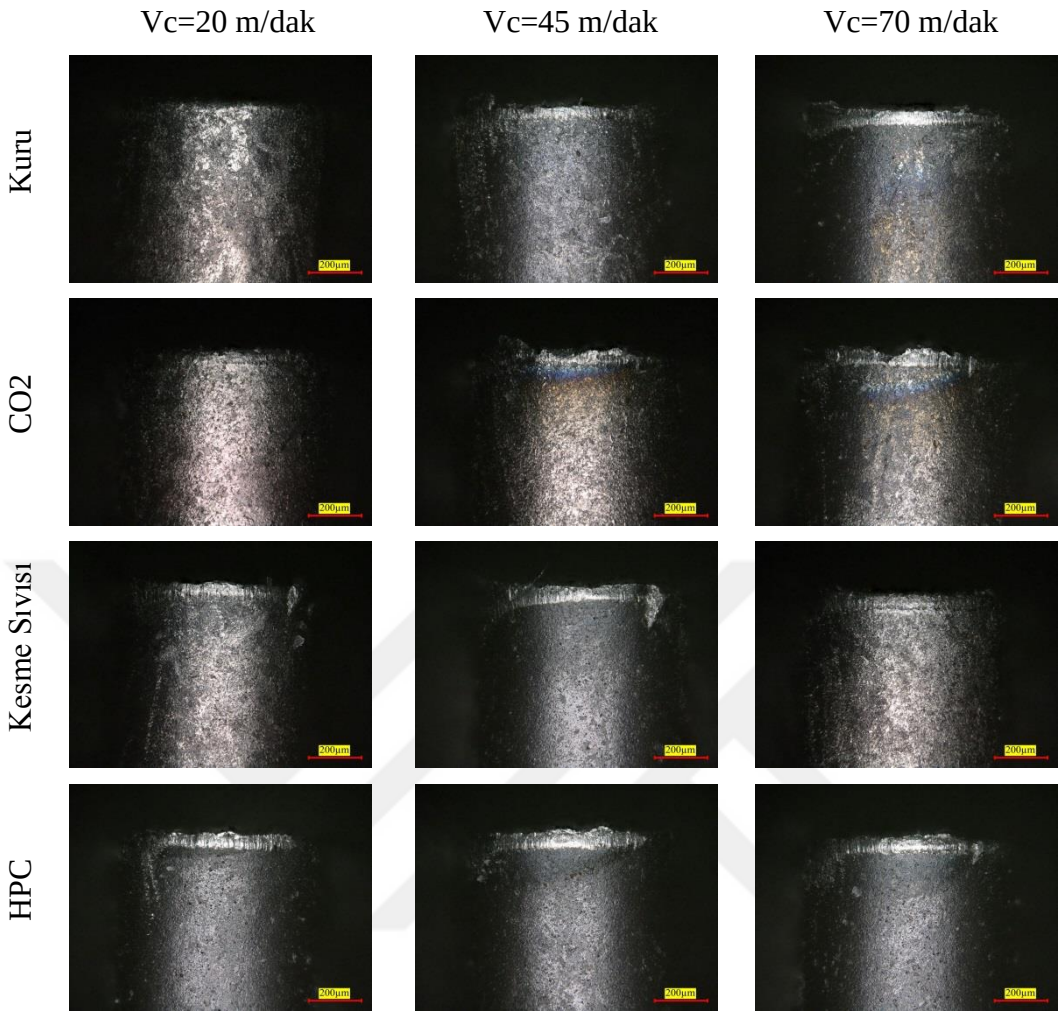
koşulunda aşınma değerleri kararlılık gösterirken yüksek basınçlı soğutma koşulunda kesme hızının artması ile gözlemlenen artış miktarı %59 olmuştur.



Şekil 4.11. Farklı kesme koşulları ve kesme hızlarında yapılan talaş kaldırma operasyonlarında oluşan serbest yüzey aşınma değerleri (f=0.16 mm/dev)

4.4 Burun Aşınması

Takım aşınmalarında bakılan bir diğer parametre kesici takımın uç kısmında oluşan burun aşınmasıdır. Bu çalışma kapsamında yapılan tüm kesme deneyler için dijital optik mikroskop altında burun aşınma görüntüleri ve aşınma değerleri alınmıştır. Şekil 4.12' de alınan burun aşınması görüntüleri sunulmuştur. Şekil genel olarak incelendiğinde, burun aşınma değerlerine hem kesme hızının hem de kesme koşulunun etkisi olmuştur. Kesme hızı açısından şekil incelendiğinde, kesme hızının artması ile burun aşınma oranlarında tüm kesme koşulları için bir artış eğilimi söz konusudur. Bu durum kesme hızının artması ile artan kesme sıcaklığı ve artan sürtünme kuvveti ile açıklanabilir [45].

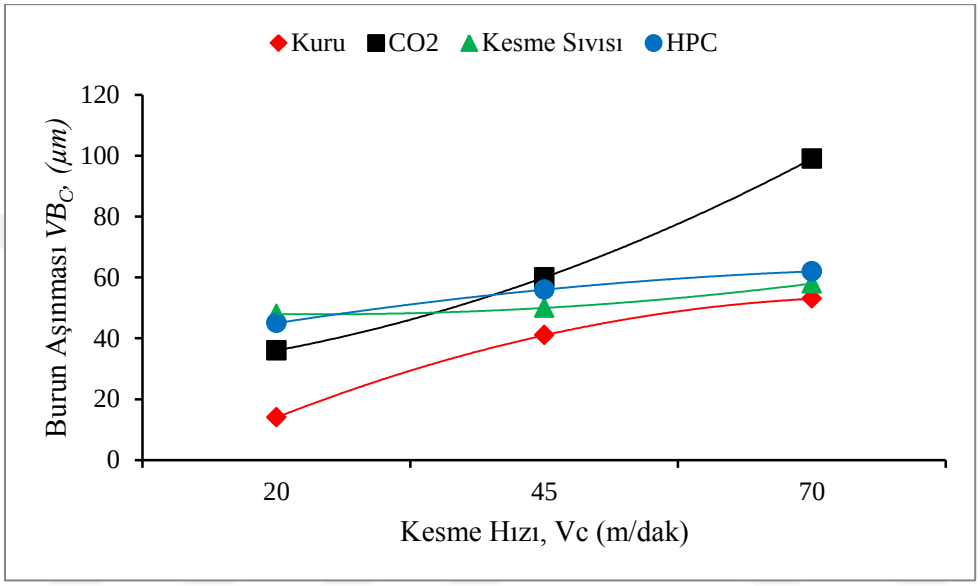


Şekil 4.12. Farklı kesme koşulları ve kesme hızlarında yapılan talaş kaldırma operasyonlarında oluşan burun aşınma görüntüleri (f=0.08 mm/dev)

Şekil 4.13' te farklı kesme koşulları ve hızlarında kesici takımda meydana gelen burun aşınması değerleri sunulmuştur. Şekle genel olarak bakıldığında aşınma görüntülerini destekler nitelikte kesme hzıının artması ile aşınma değerlerinin arttığı görülmektedir. 20 m/dak kesme hızında en düşük burun aşınması kuru kesme koşuılunda 14 µm olarak ölçülmüştür. En yüksek aşınma değeri ise kesme sıvısı koşulunda yaklaşık 48 µm olarak ölçülmüştür. Bu değer CO_2 yardımlı soğutma koşulunda 36 µm olarak ölçülmüş olup, HPC koşulunda ise yaklaşık 45 µm olmuştur. Görüldüğü üzere 20 m/dak kesme hızı ve 0.08 mm/dev ilerlemede aşınma değerleri takım ömrü açısından önem arz etmeyecek derecede olmuştur. Kuru kesme koşulunda aşınma değerinin diğer kesme koşullarına göre daha düşük olmasının sebebi, sıcaklığın kesme bölgesinde daha fazla olmasından kaynaklı iş parçasında meydana gelen termal yumuşama nedeniyle kesme işleminin daha

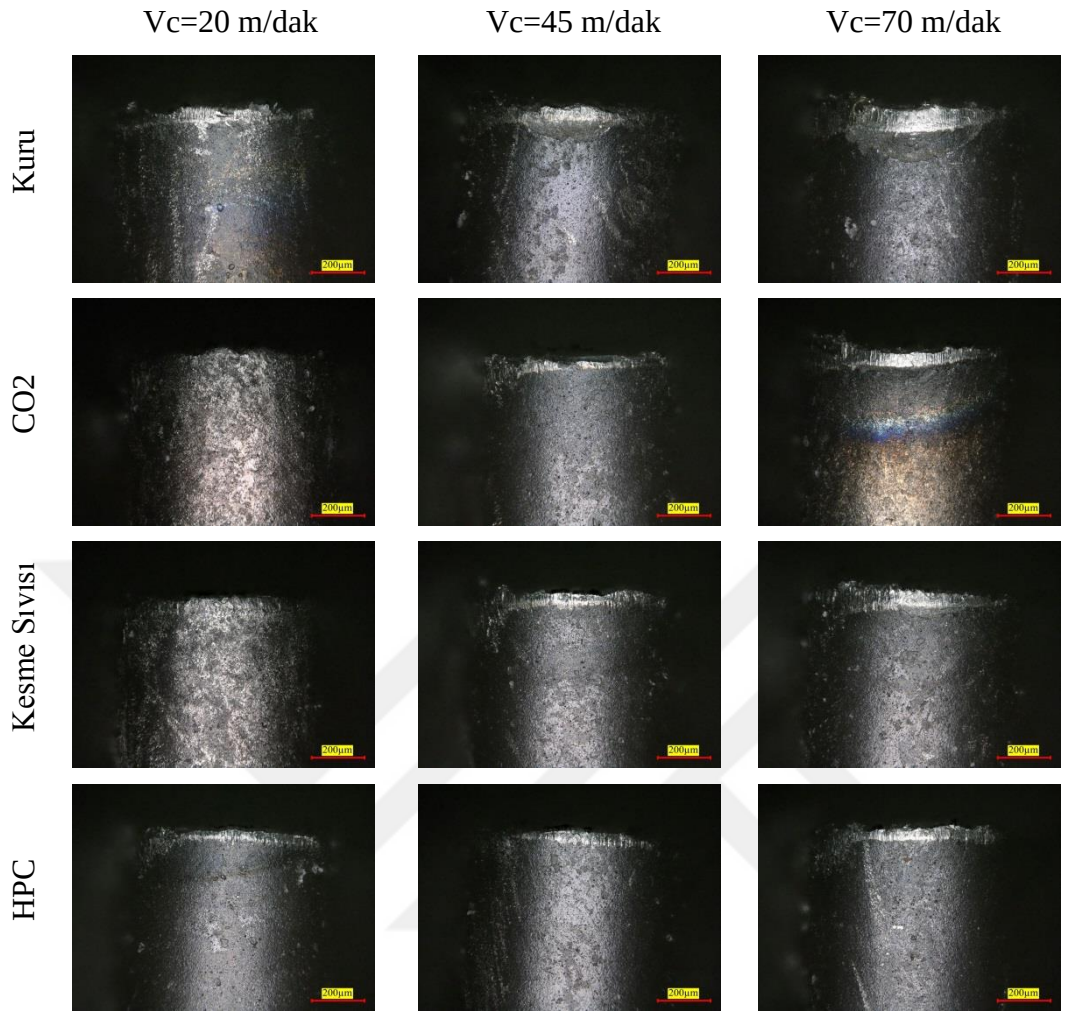
kolay gerçekleşmiş olmasıdır. Bu eğilim, kesme hızının artmasıyla beraber tüm kesme koşuıllarında devam etmiştir.

70 m/dak kesme hızında en düşük aşınma değeri kuru kesme koşuluında 53 µm, en yüksek aşınma değeri ise CO_2 koşulunda 99 µm oolarak ölçülmüştür. Diğer kesme koşullarında oluşan burun aşınması değerleri, kuru kesme ve CO_2 koşulları arasında değerler almışlardır.



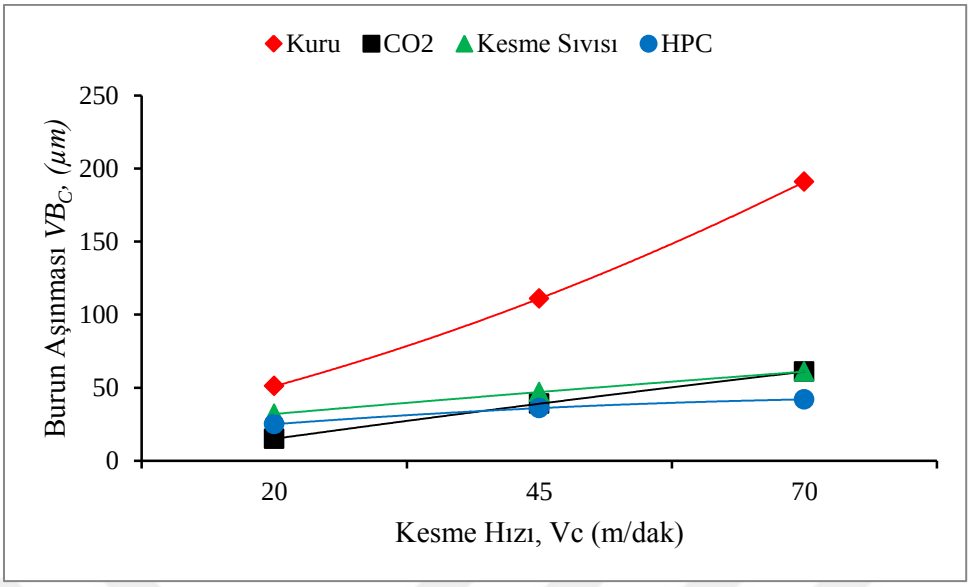
Şekil 4.13. Farklı kesme koşulları ve kesme hızlarında yapılan talaş kaldırma operasyonlarında oluşan burun aşınma değerleri (f=0.08 mm/dev)

Şekil 4.14' te farklı kesme koşuları ve kesme hızlarında 0.16 mm/dev ilerleme de yapılan talaş kaldırma operasyonlarında kesici takımda meydana gelen burun aşınması görüntüleri sunulmuştur. Görüleceği üzere kesme hızının artmasıyla birlikte tüm kesme koşullarında burun aşınmaları artmıştır.



Şekil 4.14. Farklı kesme koşulları ve kesme hızlarında yapılan talaş kaldırma operasyonlarında oluşan burun aşınma görüntüleri (f=0.16 mm/dev)

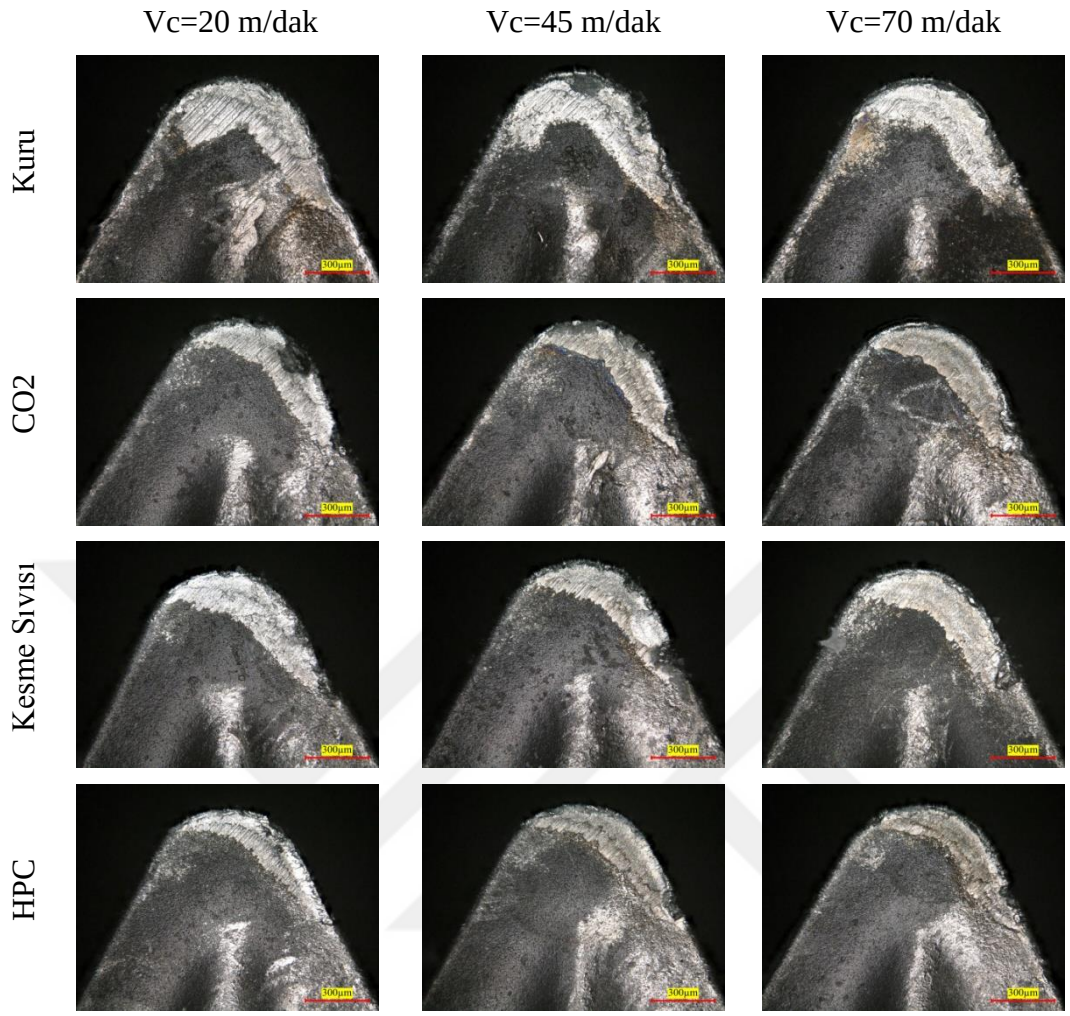
Şekil 4.15' te farklı kesme koşulları ve kesme hızlarında 0.16 mm/dev ilerleme değerinde yapılan talaş kaldırma operasyonlarında kesici takımda oluşan burun aşınması değerleri sunulmuştur. Şekle bakıldığında 0.08 mm/dev ilerleme değerinde olduğu gibi kesme hızının artmasıyla aşınmanın artması eğilimi görülmektedir. 20 m/dak kesme hızında en az aşınma CO2 koşuılunda 15 µm iken, en çok aşınma kuru kesme koşulunda 51 µm olarak ölçülmüştür. Kesme hızının 70 m/dak olduğu durumda ise, en az aşınma 42 µm ile HPC koşulunda iken, en çok aşınma 191 µm ile kuru kesme koşulunda ölçülmüştür. Görüldüğü üzere tüm kesme hızlarında kuru kesme koşulunda ölçülen burun aşınması değerleri en yüksektir. Bunun sebebi, kesme deneylerinde kullanılan kesici takımın kaplamasının ve karbürün ergime sıcaklığının üzerinde kesme sıcaklıkları oluşmasıdır [50, 51].



Şekil 4.15. Farklı kesme koşulları ve kesme hızlarında yapılan talaş kaldırma operasyonlarında oluşan burun aşınma değerleri (f=0.16 mm/dev)

4.5 Takım-Talaş Temas Alanı

Talaşlı imalat operasyonları sonrasında kesici takım ile talaş temas alanı dijital optik mikroskop yardımı ile görüntüleri alınmış ve temas alanı ölçülmüştür. Şekil 4.16' da 0.08 mm/dev ilerlemede faklı kesme koşullarında ve farklı kesme hızlarında oluşan takım temas alanı görüntüleri sunulmuştur. Şekilde görüldüğü üzere takım temas alanı her bir koşul için net bir şekilde görülmektedir. Takım talaş temas alanına kesme hızının etkisi sınırlı olmuştur. Fakat kesme koşulları arasında önemli farklar oluşmuştur.

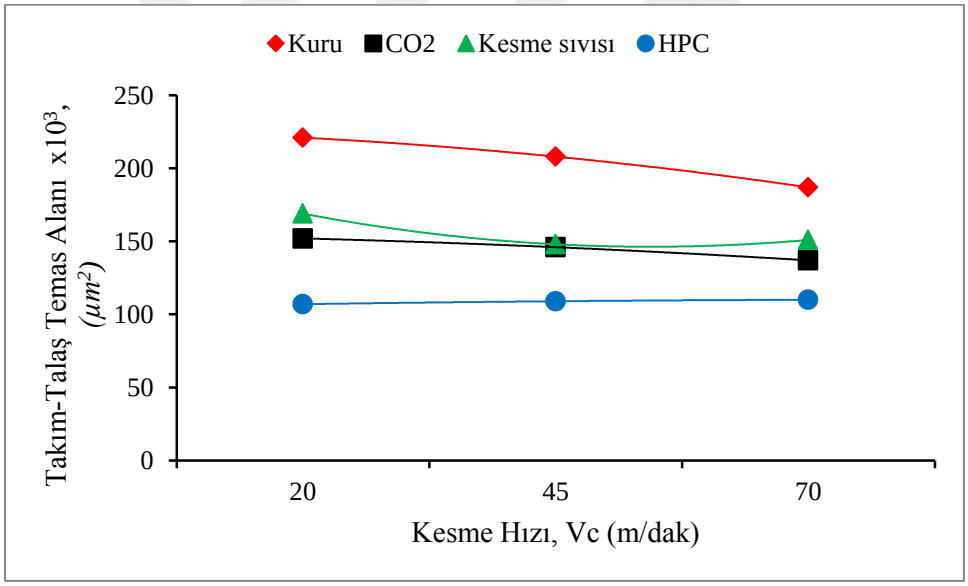


Şekil 4.16. Farklı kesme koşulları ve kesme hızlarında yapılan talaş kaldırma operasyonlarında oluşan takım-talaş temas alanı görüntüleri (f=0.08 mm/dev)

Dijital optik mikroskop altında incelenen kesici takımların talaş temas alanı değerleri Şekil 4.17' de sunulmuştur. Kesme hızına ve kesme koşuluna bağlı olarak oluşturulan şekilde kesme koşullarının etkisi net olarak görülmektedir. Kesme hızının artması ile temas alanlarında az da olsa bir azalma görülmüştür. 20 m/dak kesme hızında en az temas alanı yüksek basınçlı soğutma koşulunda görülmüştür. Bunun sebebi yüksek basınçlı soğutma koşulunun takım talaş arayüzeyine iyi bir şekilde nüfuz etmesidir. En düşük kesme hızında en fazla temas alanı ise kuru kesme koşulunda olmuştur. Kuru kesme koşulu yüksek basınçlı soğutma koşuluna göre %106 oranında daha fazla takım-talaş temas alanı oluşturmuştur. Kesme sıvısı koşulunda ise temas alanı kuru kesmeye oranla yaklaşık olarak %24 daha az oluşmuştur. Karbondioksit yardımlı soğutma koşulunda oluşan temas alanı kuru kesme koşulundan %31 daha az olmuştur.

Karbondioksit yardımlı soğutma koşulunun takım talaş ara yüzeyine nüfuz ederek temas alanı azalttığı görülmüştür.

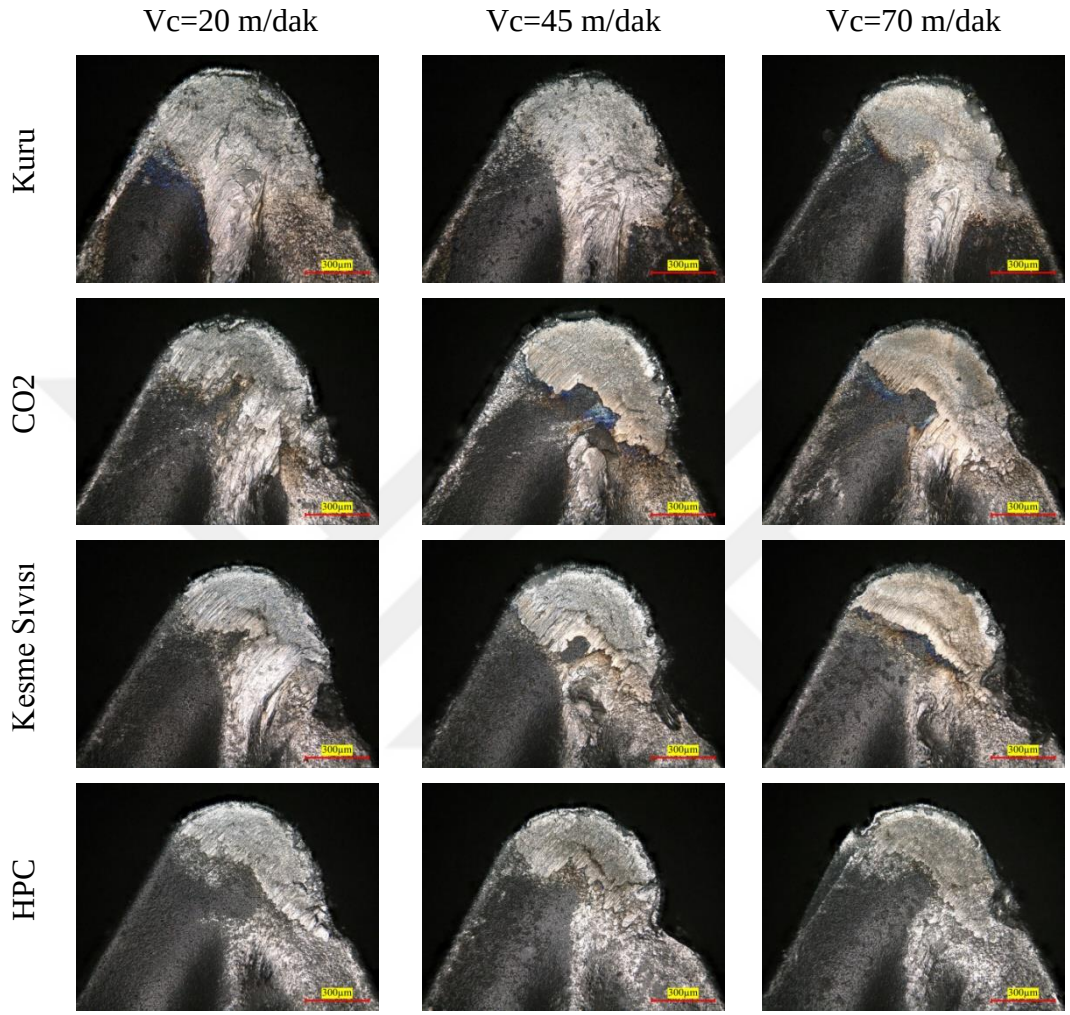
En yüksek kesme hızı olan 70 m/dak kesme hızında en fazla temas alanı oluşan kesme koşulu kuru kesme olmuştur. En az temas alanına sahip kesme koşulu ise tüm kesme koşullarında olduğu gibi yüksek basınçlı soğutma koşulunda olmuştur ve bu değer kuru kesme koşulunda %41 daha azdır. Kesme koşulunda oluşan temas alanı ise kuru kesme koşulunda yaklaşık olarak %19 daha az olmuştur. Kriyojenik kesme koşulu olan karbondioksit yardımlı soğutma koşulunda ise kuru kesmeye oranla %27 daha az temas alanı oluşmuştur. Görüldüğü üzere takım talaş temas alanlarında kesme koşullarının etkisi önemli derecede etkili olmuştur. Tüm kesme hızlarında en fazla temas alanı kuru kesme koşulunda olurken en az temas alanı ise yüksek basınçlı soğutma koşulunda olmuştur. Kesme bölgesine 50 bar olarak gönderilen yüksek basınçlı soğutma koşulu takım temas alanını azaltmada oldukça etkili bir yöntem olmuştur.



Şekil 4.17. Farklı kesme koşulları ve kesme hızlarında yapılan talaş kaldırma operasyonlarında oluşan takım-talaş temas alanı değerleri (f=0.08 mm/dev)

İlerlemenin 0.16 mm/dev olduğu durumda yapılan çalışma sonrasında oluşan takım talaş temas görüntüleri Şekil 4.18' de kesme hızına ve kesme koşuluna bağlı olarak sunulmuştur. Şekil incelendiğinde 0.08 mm/dev ile yapılan testlerde oluşan temas alanlarına göre çok daha fazla temas alanı oluşmuştur. Bunun sebebi ilerlemenin artması ile artan talaş kesit alanı olmuştur.

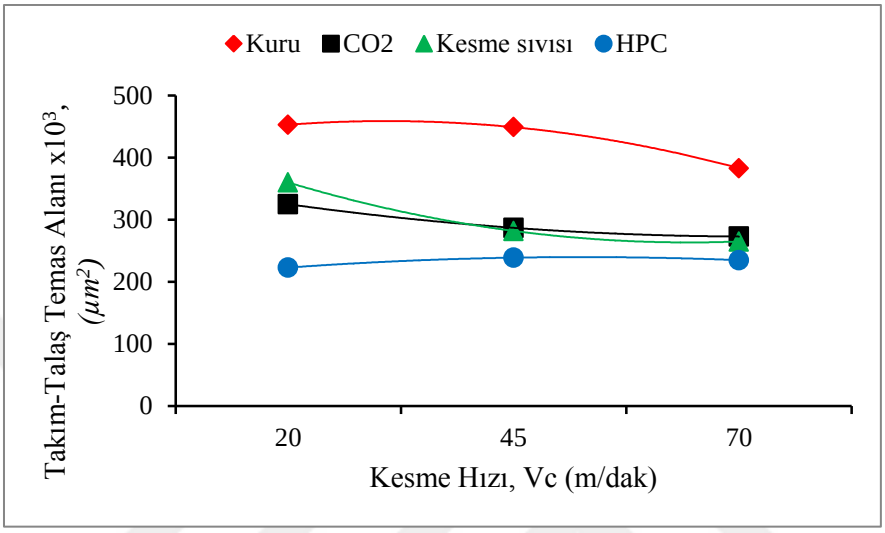
Takım talaş temas alanlarında kesme koşulları arasında önemli farklar oluşmuştur. Özellikle yüksek basınçlı soğutma koşulu takım talaş temas alanın diğer kesme koşullarına göre oldukça azaltmıştır.



Şekil 4.18. Farklı kesme koşulları ve kesme hızlarında yapılan talaş kaldırma operasyonlarında oluşan takım-talaş temas alanı görüntüleri (f=0.16 mm/dev)

Şekil 4.19' da 0.16 mm/dev ilerlemede oluşan takım talaş temas alanı değerleri sunulmuştur. Şekil incelendiğinde tüm kesme koşullarında kuru kesme koşulu en fazla temas alanının oluşmasını sağlarken en az temas alanı ise yüksek basınçlı soğutma koşulunda görülmüştür. Görüldüğü üzere ilerlemenin artması ile yüksek basınçlı soğutma koşulu halen en az temas alanı oluşmasını sağlamıştır. Bu durum gösteriyor ki yüksek basınçlı soğutma koşulunda takım talaş arayüzeyine soğutma sıvısı iyi bir şekilde nüfus etmiştir. En düşük kesme hızı olan 20 m/dak kesme hızında ve yüksek basınçlı soğutma koşulunda kuru kesmeye oranla %51 daha az temas alanı ölçülmüştür.

Karbondioksit yardımlı soğutma koşulunda ve kesme sıvısı koşulunda ise bu oran sırasıyla %28 ve %20 olmuştur. En yüksek kesme hızı olan 70 m/dak kesme hızında ve yüksek basınçlı soğutma koşulunda ise kuru kesmeye oranla %39 daha az temas alanı ölçülmüştür. Karbondioksit yardımlı soğutma koşulunda ve kesme sıvısı koşulunda ise bu oran sırasıyla %29 ve %31 olmuştur.

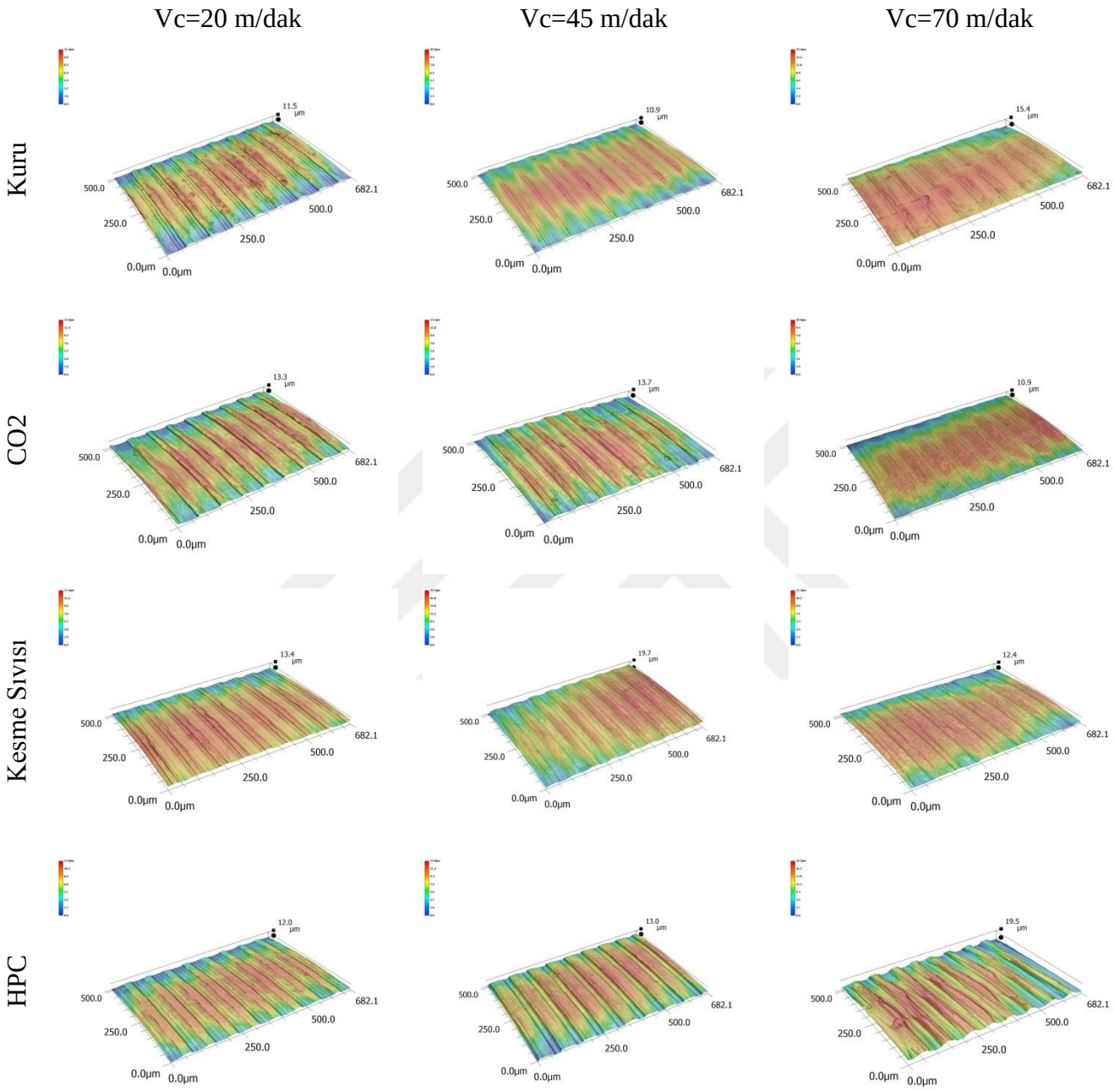


Şekil 4.19. Farklı kesme koşulları ve kesme hızlarında yapılan talaş kaldırma operasyonlarında oluşan takım-talaş temas alanı değerleri (f=0.16 mm/dev)

4.6 Yüzey Topoğrafisi

NiTi şekil hafızalı alaşımı, kullanım alanları gözönüne alındığında yüzey kalitesi önemli bir parametre olarak karşımıza çıkmaktadır. Özellikle biyouyumlu bir malzeme olması dolayısıyla biyomedikal alanında kendine uygulama alanı bulan NiTi alaşımın nihai boyutlarında üretilmesi için geçirdiği bir takım imalat prosesleri sonucu yüzey kalitesinin iyi olması istenir. Nitekim kesilmesi zor malzemeler grubundan bir malzeme olan NiTi alaşımın talaşlı imalatında karşılaşılan problemler, yüzey kalitesini olumsuz etkilemektedir. Bu etkilerin başında da talaş kaldırma operasyonlarında karşılaşılan kötü talaş kırılabilirliği, kesme sırasında meydana gelen iş parçasında talaş sarması gibi etmenler gösterilebilir. Daha önce yapılan çalışmalarda da bu durumun yüzey kalitesini bozucu olumsuz bir durum olduğuna dair örnekler mevcuttur [38]. Ayrıca talaş kaldırma operasyonunda kesici takımda meydana gelen aşınmalar da yüzey kalitesini bozucu etkisi yapılan çalışmalarda gösterilmiştir [29, 30]. Şekil 4.20' de NiTi alaşımın farklı kesme koşulları ve kesme hızlarında 0.08 mm/dev ilerleme değerinde yapılan talaş

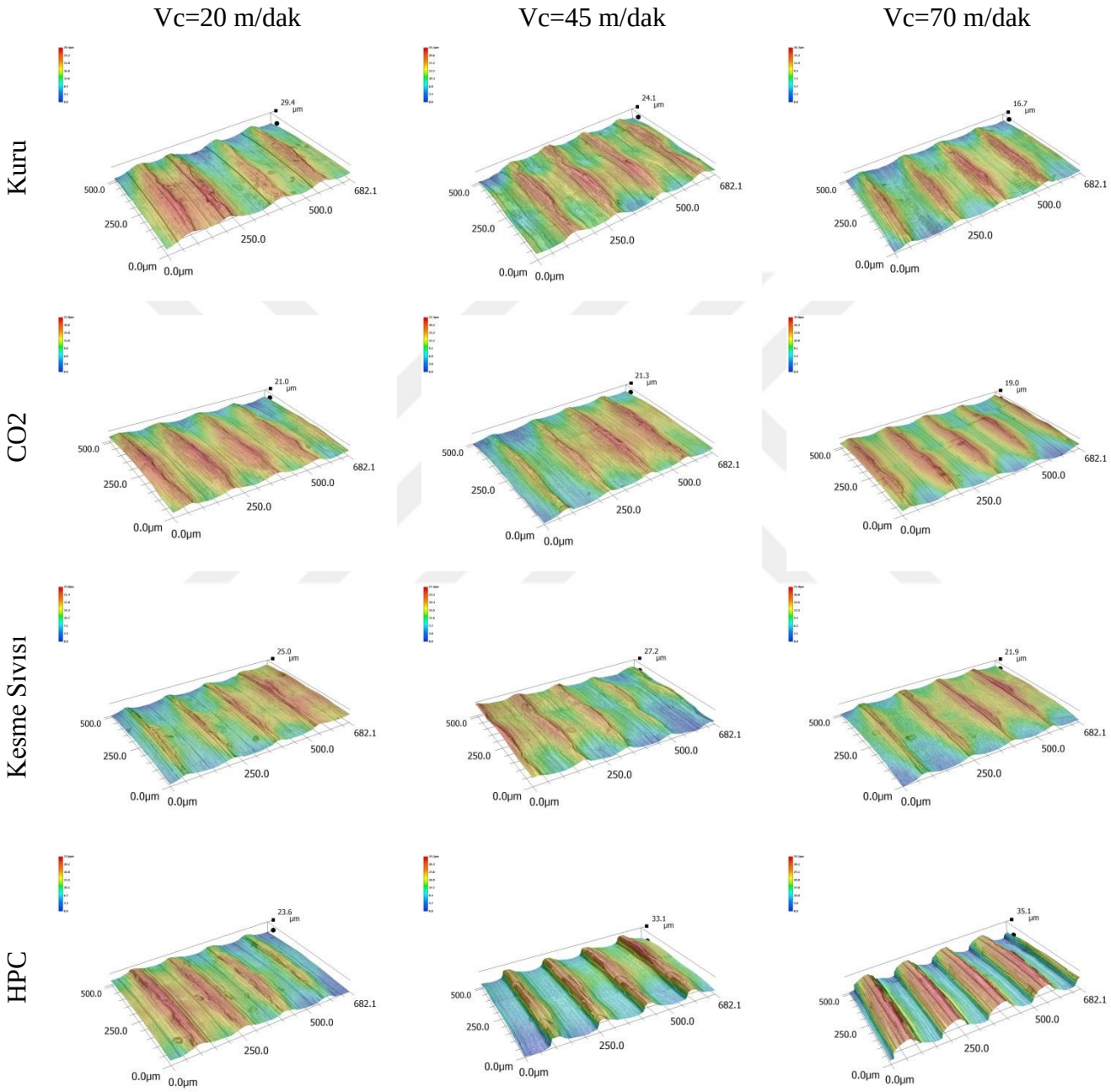
kaldırma operasyonları sonucu elde edilen işlenmiş yüzey topoğrafi görüntüleri sunulmuştur.



Şekil 4.20. Farklı kesme koşulları ve kesme hızlarında yapılan talaş kaldırma operasyonlarında iş parçası yüzey topoğrafi görüntüleri (f=0.08 mm/dev)

Şekilde de görüleceği üzere kuru, CO_2 ve kesme sıvısı koşullarında kesme hızının artmasıyla işlenmiş yüzeylerde ilerle izlerinin oluşturduğu dip ve tepe (pik and valley) noktaların arasındaki mesafelerin azaldığı, daha pürüzsüz bir yüzey elde edildiği

görülmektedir. Bu durum kesici takımda meydana gelen burun aşınmasının kesme hızının artmasıyla birlikte, silici(wiper) uç görevi üstlenmesi dolayısıyla oluşmuştur. Tam tersi şekilde HPC koşulunda ise kesme hızının artmasıyla, ilerleme izlerinin belirginleşmiş ve yüzey topoğrafisi kötüleşmiştir.



Şekil 4.21. Farklı kesme koşulları ve kesme hızlarında yapılan talaş kaldırma operasyonlarında iş parçası yüzey topoğrafi görüntüleri (f=0.16 mm/dev)

NiTi alaşımın farklı kesme hızları ve parametrelerinde 0.16 mm/dev ilerleme değerinde işlenmesi sonucu elde edilen yüzey topoğrafi görüntüleri Şekil 4.21' de sunulmuştur. Burada da ilerleme değerinin artmasıyla yüzey topoğrafilerinde oluşan farklılar açık şekilde görülmektedir. İlerleme izleri arasındaki mesafeler ilerleme değerinin artmasıyla birlikte artmıştır. Düşük ilerleme değeri olan 0.08 mm/dev değerindeki topoğrafiler de görülen eğilim, ilerleme değerinin artmasıyla değişmemiş, yine kuru, CO_2 ve kesme sıvısı koşullarında topoğrafi görüntüleri incelendiğinde kesme hızının artmasıyla yüzeyin daha düzgün olduğu, HPC koşulunda ise kesme hızının artmasıyla yüzey kalitesinin kötüleştiği görülmektedir.

4.7 Yüzey Pürüzlülüğü

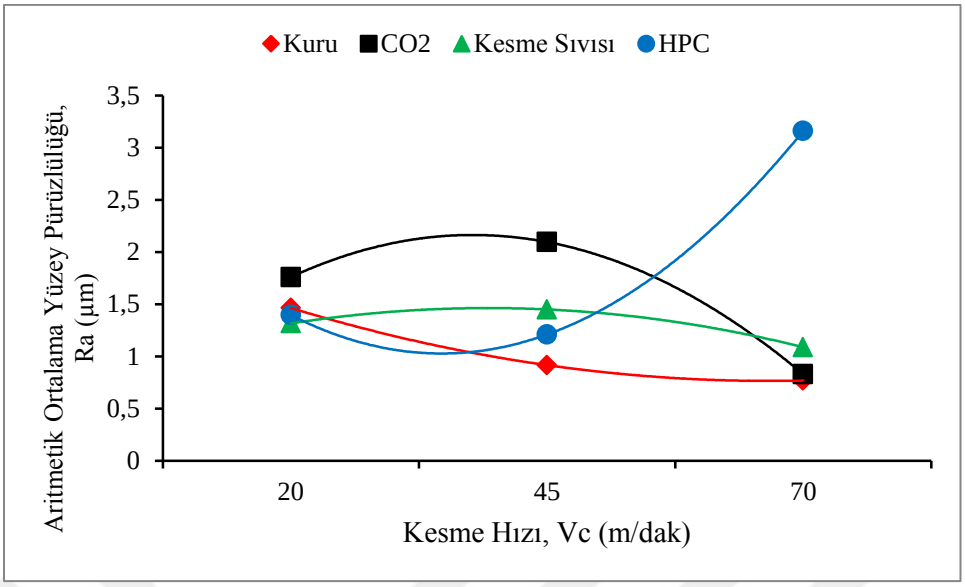
Yüzey pürüzlülüğü, biyouyumlu malzemeler için önemli bir kriterdir. Sadece biyouyumlu olmasından değil, birbiri ile temas halinde çalışacak parçaların iyi çalışma performansı göstermesi ve yorulma ömürlerinin iyi olması açısından da yüzey kalitelerinin iyi olması istenir. Şekil 4.22' de farklı kesme hızları ve koşullarında 0.08 mm/dev ilerleme değerinde yapılan talaş kaldırma operasyonlarında ölçülen iş parçası yüzey pürüzlülük değerleri sunulmuştur. Genel olarak bakıldığında kesme hızının artmasıyla kuru, CO_2 ve kesme sıvısı koşullarında yüzey pürüzlülüğü değerlerinde azalmalar mevcutken, HPC koşulunda kesme hızının artmasıyla yüzey pürüzlülüğü değerlerinde artış söz konusudur. Yüzey pürüzlülüğü değerleri bir önceki bölümde sunulan yüzey topoğrafi görüntülerini destekler niteliktedir. Belirtildiği üzere kesme hızının artmasıyla görülen pürüzlülüğün azalması olayı, kesici takım burun bölgesinde meydana gelen aşınmayla ilgilidir. Yüzey pürüzlülüğünün hesaplanmasında kullanılan formül düşünüldüğünde,

$$R_a = \frac{0.0321 \times f^2}{r_c} \tag{4.1}$$

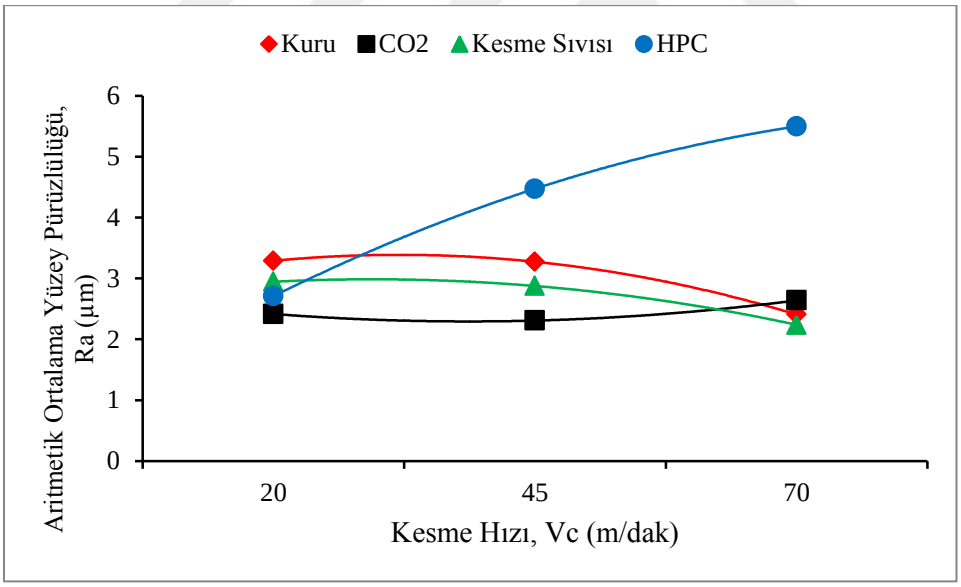
Yüzey pürüzlülüğüne etki eden temel iki faktörden birinin kesici takım burun yarıçapı olduğu görülmektedir. Burada f ilerleme değerinin r_c takım brun yarıçapını ifade etmektedir. 20 m/dak kesme hızında en düşük pürüzlülük değeri 1.31 µm ile kesme sıvısı

koşulunda iken en yüksek pürüzlülük değeri 1.76 μm ile CO_2 koşulunda ölçülmüş, kuru ve HPC koşulundaki değerler bu iki koşul arasında kalmıştır. 70 m/dak kesme hızında ölçülen pürüzlülük değerleri ise 20 m/dak kesme hızında ölçülen pürüzlülük değerleriyle kıyaslandığında kuru kesmede %48, CO_2 de %53 ve kesme sıvısında %17 azalmış, HPC koşulunda ise %127 artış göstermiştir.

Aslında HPC koşulunda yüzey kalitesinin iyi çıkması hatta diğer koşullara nazaran yüzey kalitesinde belirgin iyileşmeler sağlaması beklenmektedir. Çünkü, kesme bölgesine basınçla uygulan kesme sıvısının, talaş kaldırma operasyonu sırasında oluşan talaşları kırarak kesme bölgesinden uzaklaştırması ve iyi bir yüzey kalitesi oluşturması beklenir. 20 m/dak kesme hızında her iki ilerleme değerindeki HPC pürüzlülük değerleri incelendiğinde makul seviyelerdedir. Ancak kesme hızının 70 m/dak olmasıyla tam tersi bir etki söz konusudur. Bu durum, kesme bölgesine kesici takımın talaş yüzeyinden(rake face) uygulanan yüksek basınçlı sıvının, kesme esnasında talaş açısını değiştirici etki etmesiyle açıklanabilir. Talaş açısının yüzey pürüzlülüğüne etkisi üzerine yapılmış çalışmalar incelendiğinde de talaş açısının azalmasıyla yüzey pürüzlülüğü değerlerinde artışların olduğu görülmektedir [52]. Burada da HPC'nin talaş açısını azaltıcı etkisi dolayısıyla pürüzülük değerleri artış göstermiştir. Özellikle hem düşük hem de yüksek ilerleme değerlerinde ortak olarak HPC nin 70 m/dak kesme hızında pürüzlülük değerlerinin çok yüksek çıkması dikkat çekicidir. Kesme hızının artmasıyla kesilmiş talaş kalınlığında azalma meydana gelmektedir. Bunun sonucu olarak talaş kesit alanı azalmaktadır ve talaş kırılabilirliği kolaylaşmaktadır. Bu sebepten dolayı HPC kesme bölgesine daha iyi nüfuz etmekte ve yüksek basınçla uygulanan kesme sıvısının talaş açısını değiştirmesi daha kolay olmaktadır.



Şekil 4.22. Farklı kesme koşulları ve kesme hızlarında yapılan talaş kaldırma operasyonlarında iş parçası yüzey pürüzlülüğü değerleri (f=0.08 mm/dev)



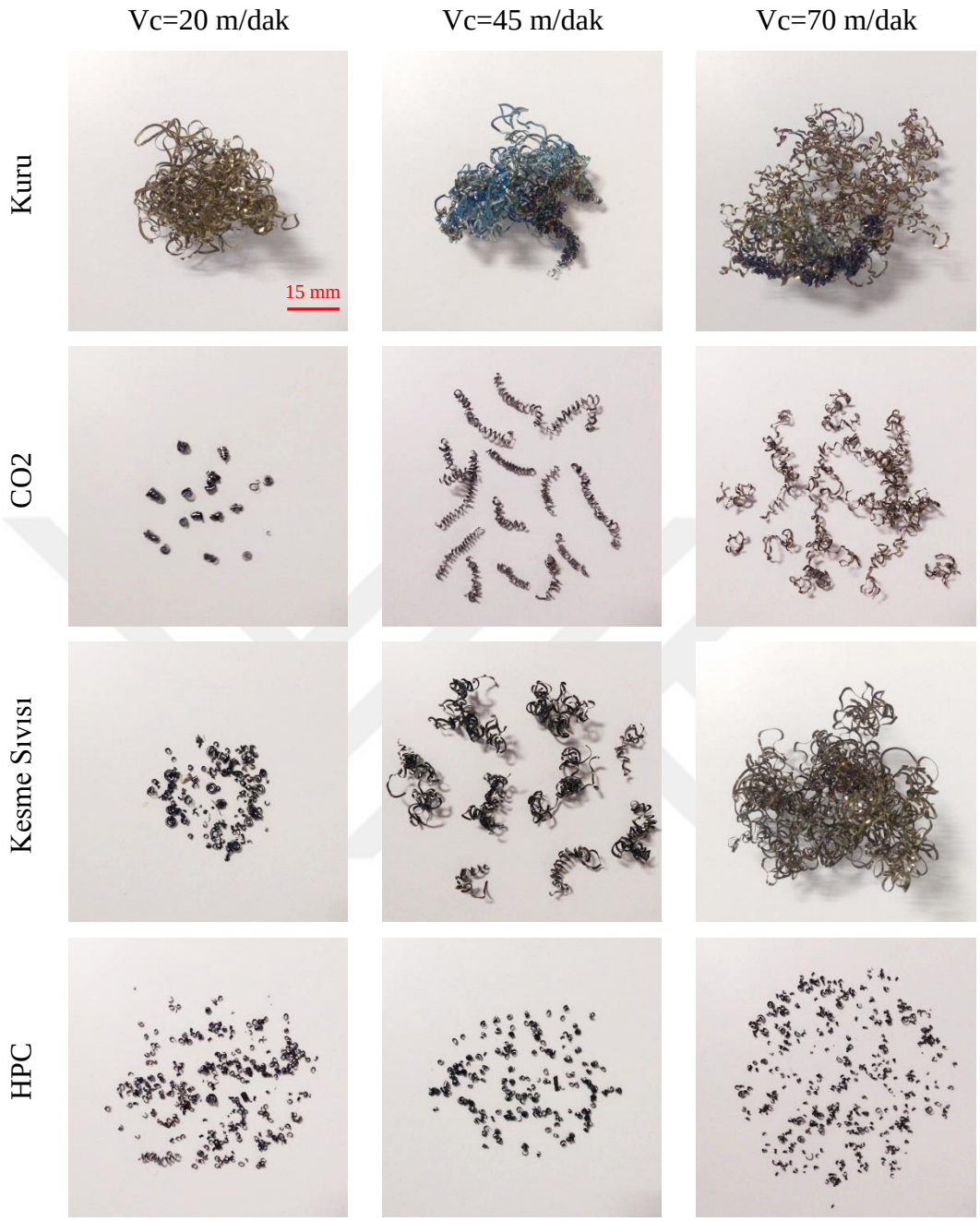
Şekil 4.23. Farklı kesme koşulları ve kesme hızlarında yapılan talaş kaldırma operasyonlarında iş parçası yüzey pürüzlülüğü değerleri (f=0.16 mm/dev)

Şekil 4.23' te farklı kesme hızları ve koşullarında 0.16 mm/dev ilerleme değerinde ölçülen pürüzlülük değerleri sunulmuştur. 20 m/dak kesme hızında en düşük pürüzlülük değeri 2.41 µm ile CO_2 kolşulunda, en yüksek pürüzlülük değeri ise 3.29 µm ile kuru kesme koşuluında ölçülmüştür. 70 m/dak kesme hızında ise en düşük pürüzlülük değeri

kesme sıvısı koşulunda 2.23 μm ve en yüksek pürüzlülük değeri HPC koşulunda 5.49 μm olarak ölçülmüştür. 20 m/dak kesme hızında ki pürüzlülük değerleri ile 70 m/dak kesme hızındaki pürüzlülük değerleri kıyaslandığında kuru kesmede %27, kesme sıvısında %24 azalma, CO_2 de %10 ve HPC de %103 artış söz konusudur.

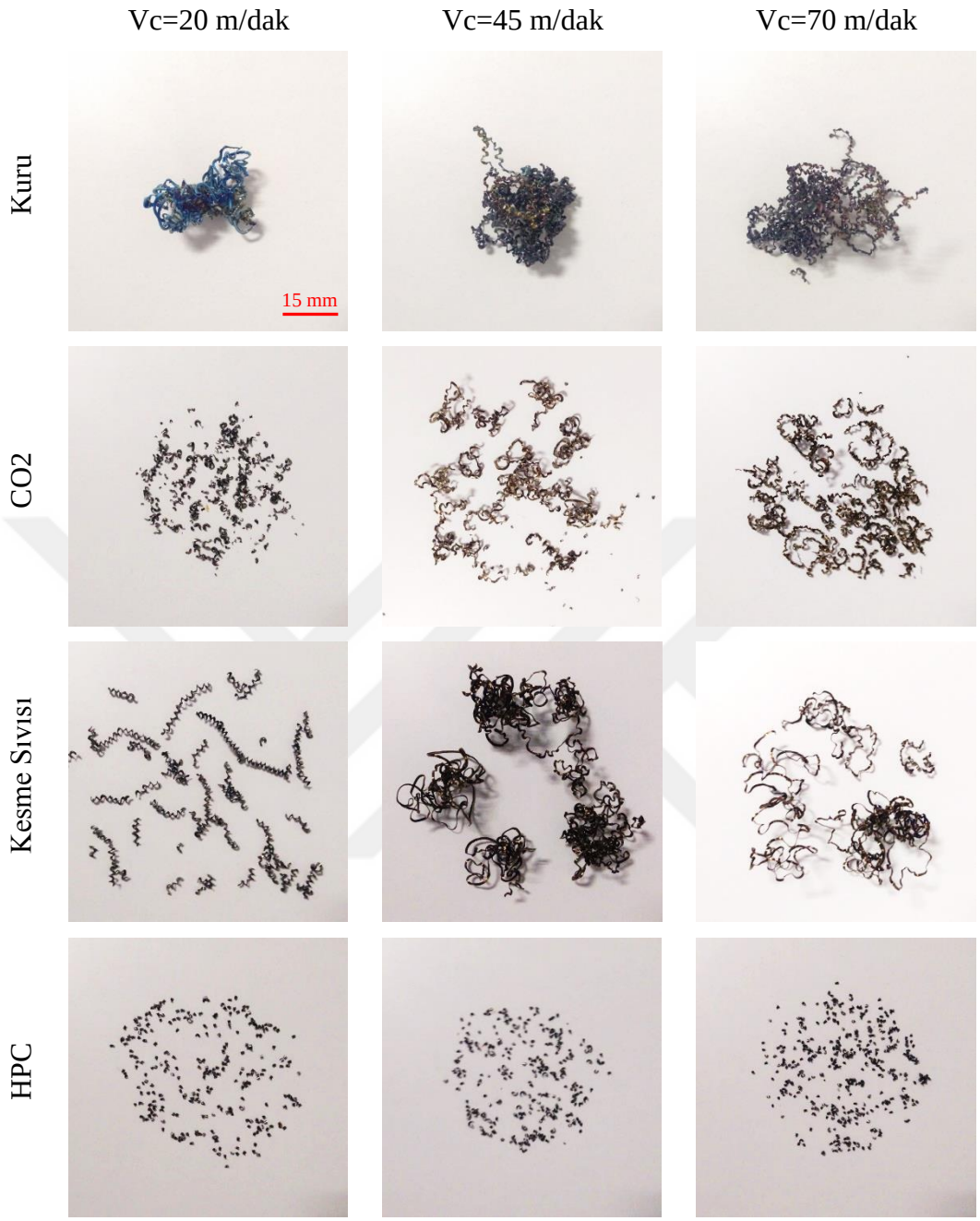
4.8 Talaş Formu ve Kırılabilirliği

Talaşlı imalat operasyonlarında elde edilen talaşlar, yapılan deneylerde işleme performansları hakkında yol gösterici olabilmektedirler. Öyle ki, talaş kaldırma operasyonlarında kullanılan kesme sıvılarının soğutucu ve yağlayıcı olmaktan başka önemli bir özelliği de, kesme esnasında oluşan talaşları kesme bölgesinden uzaklaştırarak, deney sırasında iş parçasına olası bir talaş sarma olayı yaşanıp yüzey kalitesine olumsuz etki etmesini ya da talaşın takım-iş parçası arasındaki bölgeye girerek takımın kesilmiş talaşı tekrar kesmesini önleyerek işleme performansına olumsuz etki etmesini önlemek olarak gösterilebilir. Şekil 4.24' te farklı kesme hızları ve koşullarında 0.08 mm/dev ilerleme değerinde yapılan tornalama operasyonlarında elde edilen talaşların görüntüleri sunulmuştur. 20 m/dak kesme hızında elde edilen talaşlar incelendiğinde hiçbir soğutucu ya da yağlayıcının kullanılmadığı kuru kesme koşulunda elde edilen talaşın sürekli bir talaş olduğu görülmektedir. Diğer kesme koşullarında elde edilen talaşlar ise kırık ve toz halindedirler. Özellikle HPC koşulunda toz halinde talaşlar oluşmuştur. 45 m/dak kesme hızında kuru kesme de aynı sürekli formda, HPC de toz formunda ve CO_2 ve kesme sıvısında uzun kırık talaşların oluştuğu görülmektedir. Kesme hızının 70 m/dak olmasıyla HPC koşulunda toz halde, diğer koşullarda ise uzun ve sürekli talaşların oluştuğu görülmektedir. Kesme hızının artmasıyla kesilmiş talaş kalınlığı azalmakta ve bu durumda sürekli talaş oluşumu meydana gelmektedir. Ancak HPC koşulunda uygulanan yüksek basınçlı soğutucunun talaşı kırma eğilimi, kesme hızı artsa bile toz formunda talaşların oluşumuna neden olmuştur.



Şekil 4.24. Farklı kesme koşulları ve kesme hızlarında yapılan talaş kaldırma operasyonlarında elde edilen talaş görüntüleri (f=0.08 mm/dev)

Farklı kesme hızları ve koşullarında 0.16 mm/dev ilerleme değerinde yapılan talaş kaldırma operasyonlarında elde edilen talaşların görüntüleri Şekil 4.25' te gösterilmiştir. HPC koşulunda tüm kesme hızlarında elde edilen talaşlar toz formunda iken, diğer kuru kesme ise sürekli talaş formları elde edilmiştir. CO_2 ve kesme sıvısı koşullarında ise 20 m/dak kesme hızında oluşan kırık talaş formları, kesme hızının artmasıyla sürekli talaş formuna dönüşmüştür.



Şekil 4.25. Farklı kesme koşulları ve kesme hızlarında yapılan talaş kaldırma operasyonlarında elde edilen talaş görüntüleri (f=0.16 mm/dev)

4.9 Mikroyapı Analizi

İşlenmiş NiTi alaşım malzemelerin dağlandıktan sonra dijital optik mikroskop ile alınmış mikroyapı görüntüleri bu bölümde incelenmiştir. Şekil 4.26' da 0.08 mm/dev ilerleme değerinde yapılan talaş kaldırma operasyonlarında numunelerin mikroyapıları kesme koşullarına ve kesme hızına bağlı olarak 300X büyütme ile incelenmiştir. Genel olarak bakıldığında işlenmiş yüzeylerde, tornalama esnasında termal ya da mekanik etkilerin etki edemeyeceği kadar iç kısımlarında kalan bölgelere kıyasla talaş kaldırmadan kaynaklı etkilenmiş katmanların oluştuğu görülmektedir. Bu katmanlar her koşul ve kesme hızında aynı oranda olmayıp, daha yakından detaylı incelenmesi gerekmektedir.

Bu hususta işlenmiş numunelerin daha yakından 1000X büyütmeyle alınmış mikroyapı görüntüleri Şekil 4.27' de sunulmuştur. Talaşlı imalat operasyonundan etkilenmiş katman değerlendirilirken, işleme performansı iyi analiz edilmelidir. Öyle ki, işleme performans kriterleri olan kesme kuvvetleri, kesici takımda oluşan aşınmalar ve en önemlilerinden biri kesme sırasında oluşan ısı, yüzey bütünlüğü karakteristikleri açısından, malzemenin yüzey ve yüzeyaltı bölgelerinde meydana gelen değişimlere etki edebilmektedirler. Bu durumu destekleyici bir yaklaşım olan Zener-Hollomon yaklaşımında tane küçülmesine etki eden ana faktörlerin gerinim hızı (strain-rate) ve sıcaklık olduğu belirtilmiştir [17]. Zener-Hollomon denklemi aşağıdaki gibi olup;

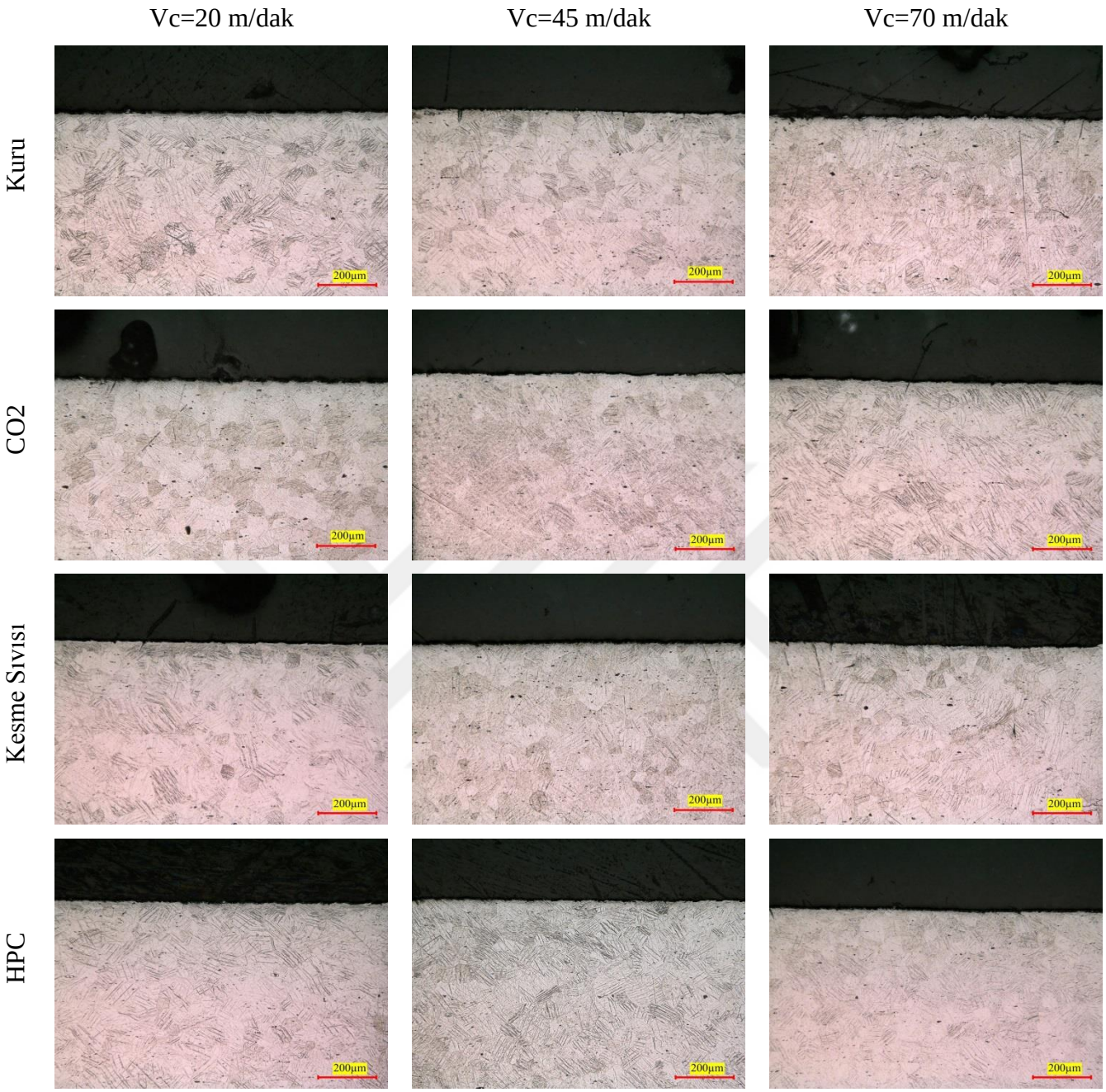
$$Z = \dot{\varepsilon} * \exp(\frac{Q}{RT}) \quad (4.2)$$

$\dot{\varepsilon}$ birim şekil değiştirme hızı, R=8.314 J/Kmol evrensel gaz sabiti, T mutlak sıcaklık (°K) ve Q (J/mol) aktivasyon enerjisini ifadde etmektedir [53]. Literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde, plastik deformasyonun yoğun olduğu durumlarda ikizlenmiş yapıların çokluğu ve yönlenmiş oldukları dikkat çekmektedir [33, 37]. Mikroskopla 1000X büyütmede alınan mikroyapı görüntülerine bakıldığında, bahsedilen bu ikizlenmelerin çoğu numunenin yüzey bölgelerinde yoğun olduğu ve farklı doğrultularda yönlenmiş oldukları görülmektedir. 20 m/dak kesme hızındaki mikroyapı görüntüleri incelendiğinde

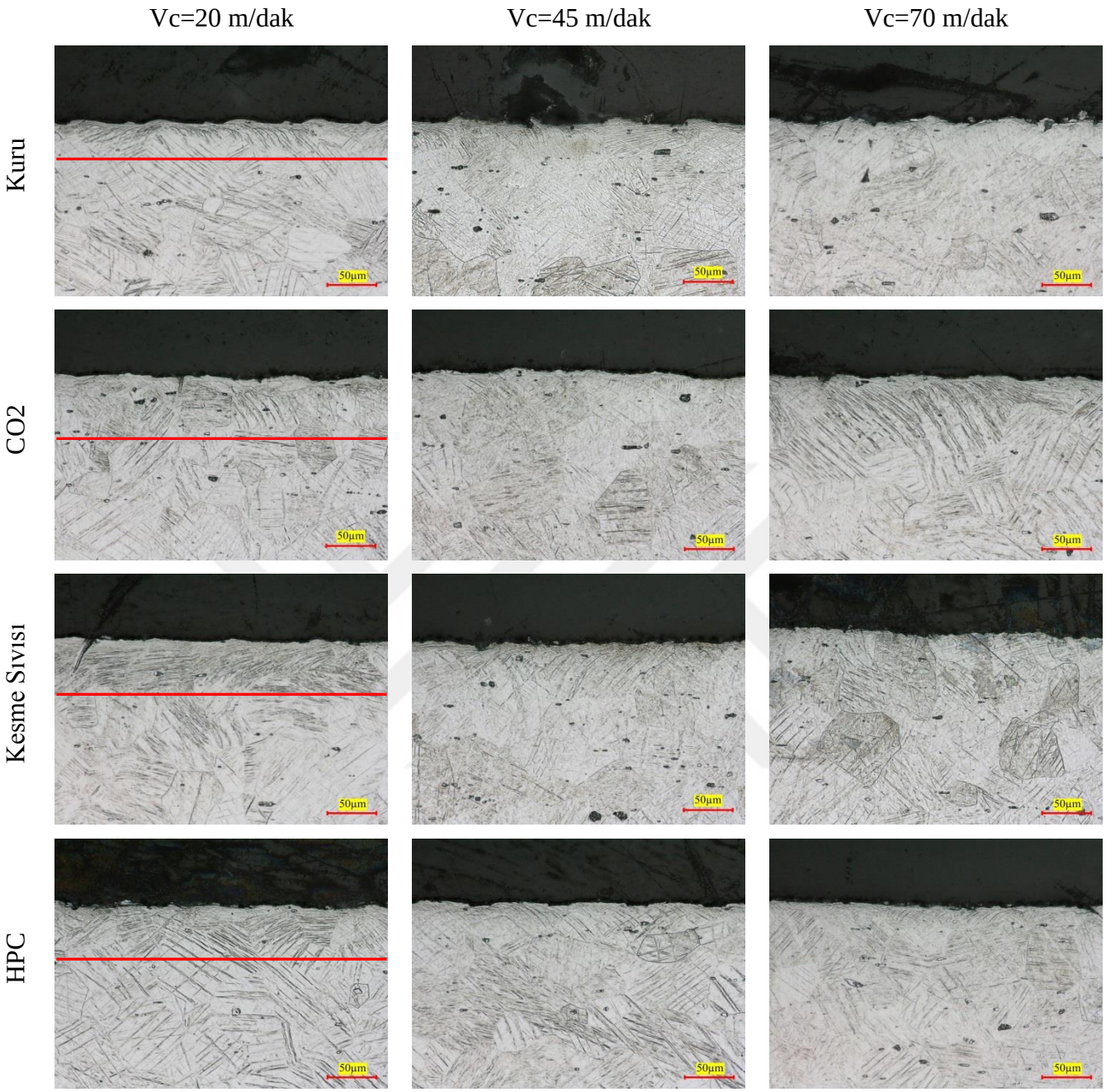
işlenmiş yüzeylerde ki farklı doğrultularda yönlenmiş ikiz yapılar dikat çekmektedir. Kuru kesmeye kıyasla soğutucu/yağlayıcıların kullanıldıkları durumlarda, yönlenmiş ikiz yapıların işlenmiş yüzeyden daha derinlerde de varolduğu görülmektedir. Kırmızı çizgilerle gösterilen etkilenmiş katman kalınlıkları da incelendiğinde en az kalınlığın kuru kesmede, en çok kalınlığın CO_2 koşulunda olduğu görülmektedir.

İşlenen bir malzemenin yüzey altı bölgelerine talaşlı imalatın etkisi üç kademede gerçekleşir. Bunları, işlenmiş yüzeyin hemen altında termal ve mekanik etkilerin ortak etki ettiği katman, bu katmanın altında sadece mekanik etkilerin etkilediği katman ve son olarak ne mekanik ne de termal etkilerin etki edemediği katman olarak sınıflandırabiliriz.

Kesme hızının artmasıyla özellikle 70 m/dak kesme hzındaki mikroyapı görüntülerinde kuru kesme koşulunda, işlenmiş yüzeydeki ikizlenmiş yapıların varlıklarının azaldığı görülmektedir. Kesme hızının artmasıyla kesme bölgesinde artan kesme sıcaklığı, kesme operasyonu sırasında meydana gelen termal/mekanik etkilerden termal etkinin dominant rol üstlenerek plastik deformasyonu yok edici etki göstermesine neden olmuştur. Bu durum CO_2 koşulunda aynı olmayıp, etkilenmiş katman kalınlığının, kriyojenik soğutma dolayısıyla mekanik etkilerin dominant rol oynamasıyla daha fazla olduğu görülmektedir. Aynı şekilde kesme sıvısı ve HPC koşullarında da kuru kesme ye kıyasla etkilenmiş katman kalınlığının daha belirgin olduğu görülmektedir.



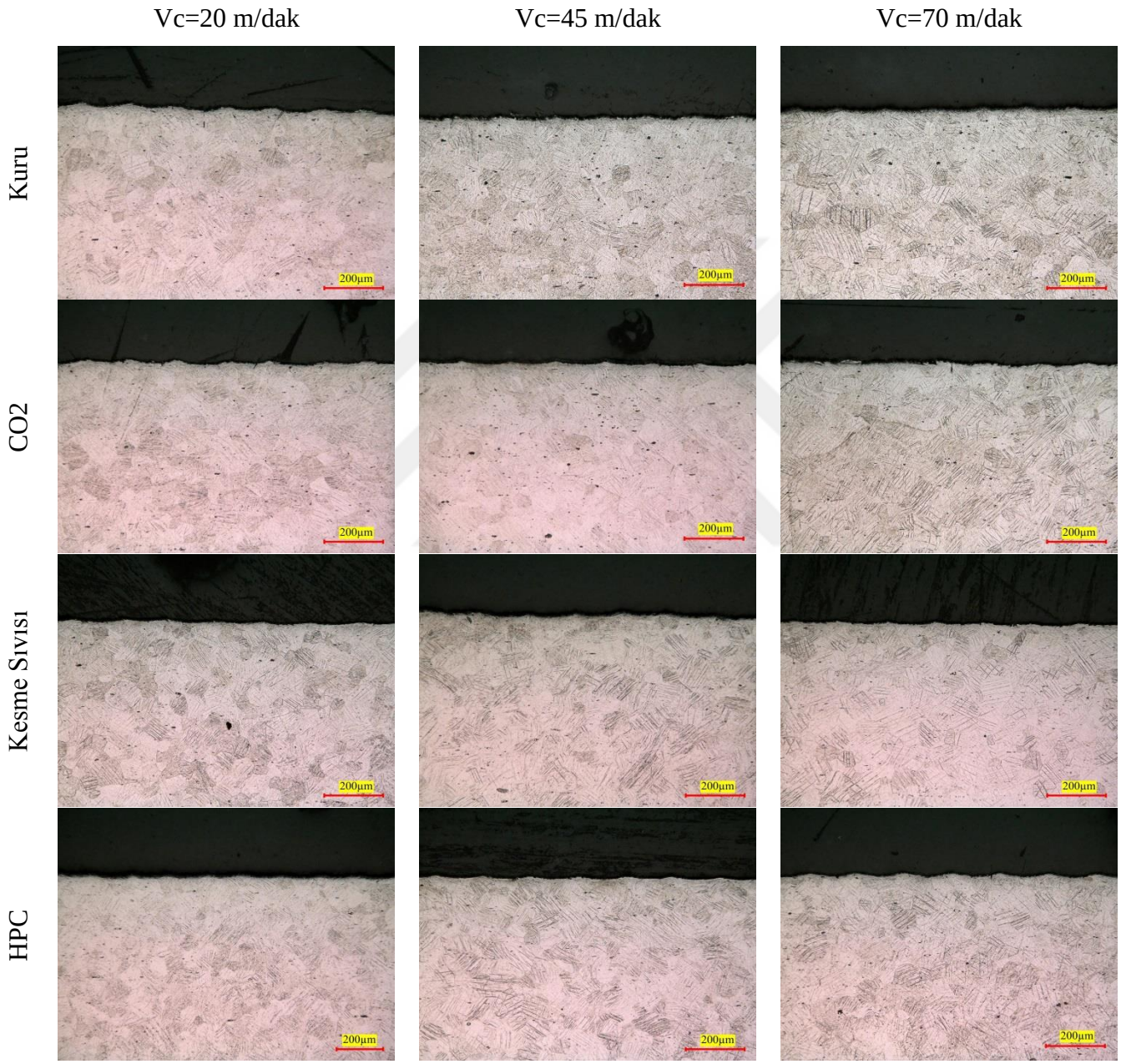
Şekil 4.26. Farklı kesme koşulları ve kesme hızlarında yapılan talaş kaldırma operasyonlarında 300X büyütmede alınan mikroyapı görüntüleri (f=0.08 mm/dev)



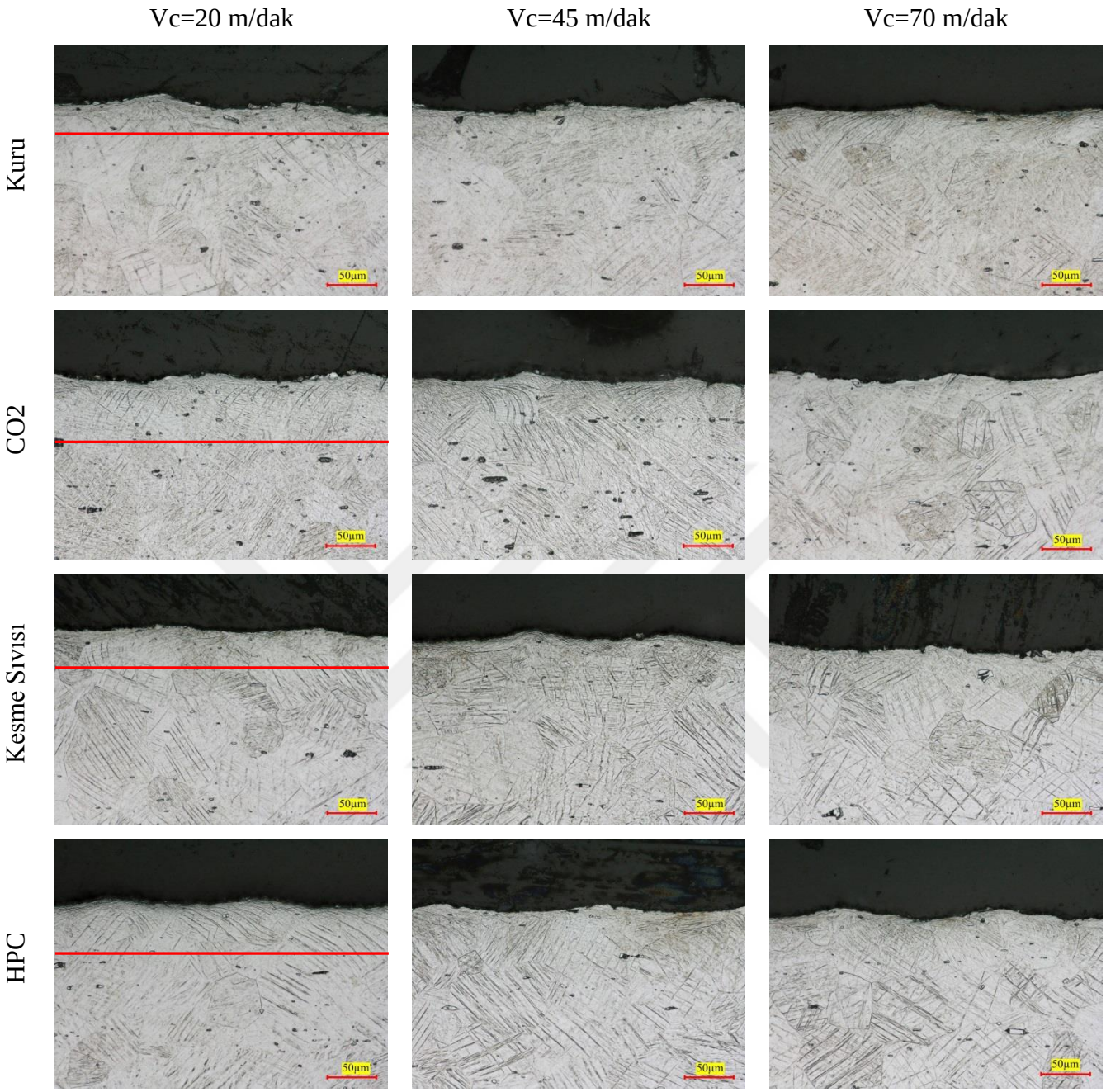
Şekil 4.27. Farklı kesme koşulları ve kesme hızlarında yapılan talaş kaldırma operasyonlarında 1000X büyütmede alınan mikroyapı görüntüleri (f=0.08 mm/dev)

Farklı kesme hızı ve koşullarında 0.16 mm/dev ilerleme değerinde işlenmiş NiTi alaşım malzemelerin 300X büyütmede alınmış mikroyapı görüntüleri Şekil 4.28' de, 1000X büyütmede alınmış mikroyapı görüntüleri ise Şekil 4.29' da sunulmuştur. İlerleme değerinin artmasıyla talaş kesit alanı artacağından plastik deformasyon oranınında artması beklenecektir. Daha önce sunulan kesme kuvvetleri de incelendiğinde, ilerleme değerinin artmasıyla kuvvetlerin arttığı görülmektedir. Ayrıca kesme sıcaklıkları da

ilerleme değerinin artmasıyla artış göstermiştir. Bu durum işlenmiş yüzeyde hem termal hem de mekanik etkilerin fazlalaşmasına yol açmaktadır. 20 m/dak kesme hızında ki mikroyapı görüntüleri incelendiğinde, 0.08 mm/dev ilerleme değerindeki mikroyapı görüntülerine kıyasla yönlenmiş ikiz yapıların yoğunluğunun daha az olduğu görülmektedir. Etkilenmiş katmanlar en az kuru kesmede oluşmuştur.



Şekil 4.28. Farklı kesme koşulları ve kesme hızlarında yapılan talaş kaldırma operasyonlarında 300X büyütmede alınan mikroyapı görüntüleri (f=0.16 mm/dev)



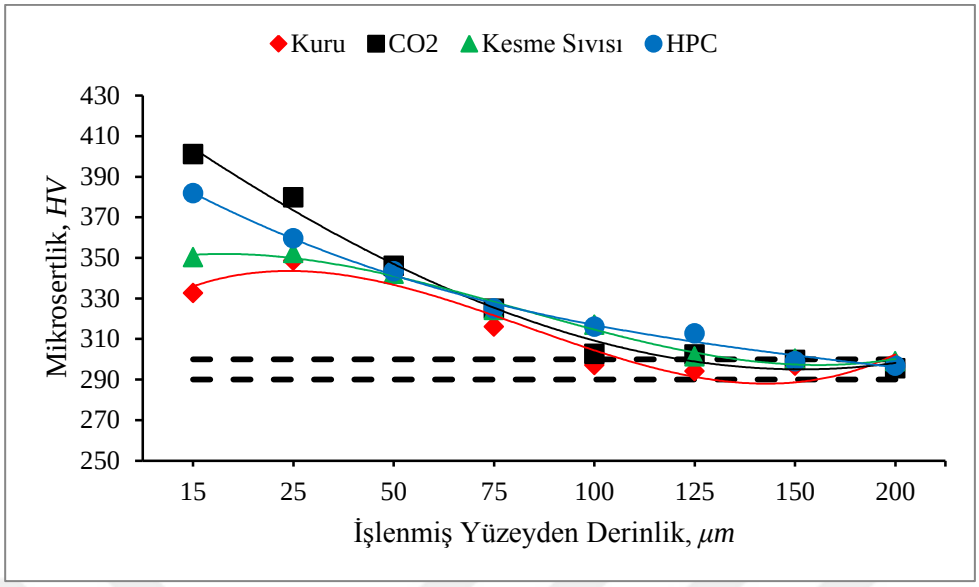
Şekil 4.29. Farklı kesme koşulları ve kesme hızlarında yapılan talaş kaldırma operasyonlarında 1000X büyütmede alınan mikroyapı görüntüleri (f=0.16 mm/dev)

İşlenmiş malzemelerin yüzey bölgelerinde gözlemlenen ikizlenme oluşumları, aslında tane sınırlarını artırıcı bir etmen olarak değerlendirilmekte ve malzemenin sertliğinin artması bu ikizlenme oluşumlarının yoğunluklarıyla yorumlanabilmektedir [33].

4.10 Mikrosertlik Analizi

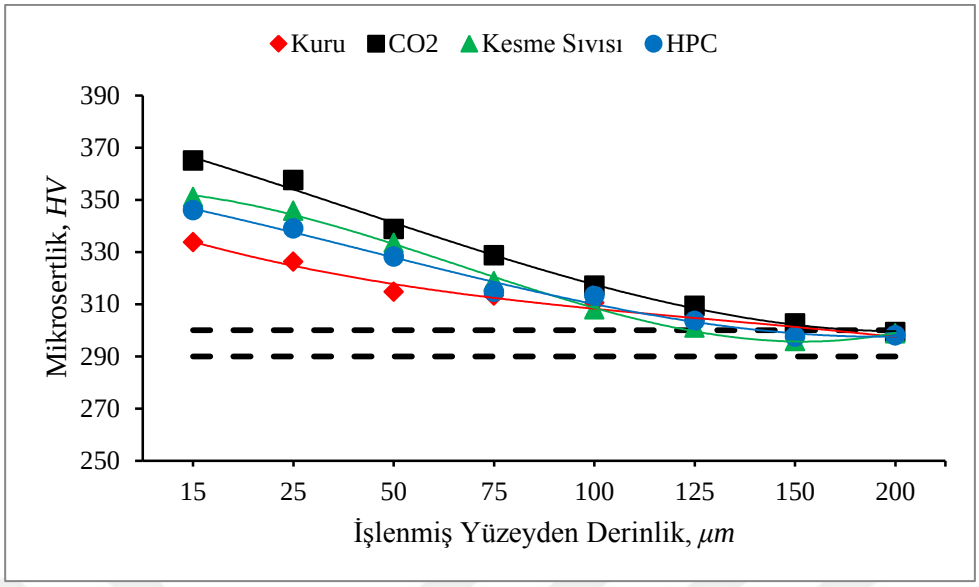
Talaş kaldırma oparasyonlarında iş parçasının işlenen yüzeyinde termal ve mekanik etkiler dolayısıyla plastik deformasyon meydana gelmektedir. Plastik deformasyona uğrayan yüzeyde pekleşme eğilimi meydana gelmekte ve işlenmiş yüzeyden itibaren işlenmemiş malzemenin sertlik değerine kıyasla, işlenmiş malzemenin sertliğinde artış meydana gelir. Bu artış öyle bir gerçekleşir ki, işlenmiş yüzeyden itibaren malzemenin iç kesimlerine doğru malzemenin artmış olan sertliği azalarak belirli bir mesafe sonra işlenmemiş malzeme sertliğine düşer. Talaş kaldırma işlemi sırasında oluşan kesme sıcaklığı, malzemenin pekleşme oranı üzerinde doğrudan etki edebilmektedir [54]. Öyle ki, yüksek kesme sıcaklıklarının oluştuğu talaş kaldırma operasyonlarında, plastik deformasyonu yok edici termal etkiler, mekanik etkilerden daha dominant olabilmektedir [33]. Nitekim özellikle soğutucu ya da yağlayıcıların kesme sıcaklığını azaltıcı etki yaptığı talaş kaldırma işlemlerinde, plastik deformasyonun daha etkin olduğu ve işlenmiş malzemenin mikrosertlik değerinin dislokasyonlar nedeniyle artmasına etkisinin önemli olduğunu söyleyebiliriz [55].

Şekil 4.30 da 20 m/dak kesme hızında ve 0.08 mm/dev ilerleme değerinde farklı soğutucu/yağlayıcı koşullarda gerçekleştirilen talaş kaldırma operasyonlarından sonra işlenmiş malzemenin yüzeyden itibaren mikrosertlik değerinde meydana gelen değişimler incelenmiştir. Genel olarak bakıldığında, literatüre paralel olarak tüm talaş kaldırma operasyonlarında malzemenin sertlik değerlerinde artış meydana gelmiştir [17]. En çok sertlik değeri 401 HV ile CO_2 koşulunda gerçekleşmiş olup işlenmemiş malzeme sertliğine kıyasla %36 artış meydana gelmiştir. Yine sertlik artışlarının yaşandığı HPC koşulunda 382 HV ile %29 ve kesme sıvısı koşulunda ise 350 HV ile%18 lik artışlar yaşanmıştır. Sertlik değeri artışının en az yaşandığı kuru kesme koşulunda 332 HV ile %13 lük bir artış söz konusu olup, en az artışın kuru kesme koşulunda yaşanmasının sebebi, bahsedildiği üzere soğutucu veya yağlayıcı kullanılmamasından dolayı diğer koşullara nazaran daha yüksek olan kesme sıcaklığının plastik deformasyonu yok edici etki (annihilation) oluşturmasıdır.



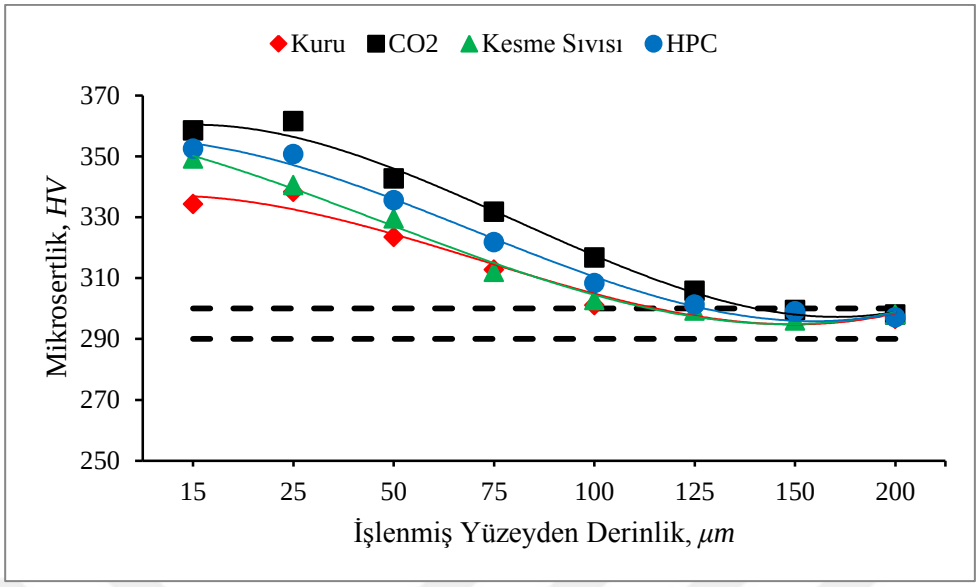
Şekil 4.30. Farklı kesme koşullarında 20 m/dak kesme hızında yapılan talaş kaldırma operasyonlarında işlenmiş yüzeyden itibaren mikrosertlik değişimleri (f=0.08 mm/dev)

70 m/dak kesme hızında ve 0.08 mm/dev ilerleme değerinde farklı kesme koşullarında gerçekleştirilen talaş kaldırma operasyonlarında işlenmiş malzemenin mikrosertlik değerlerindeki değişimler Şekil 4.31' de sunulmuştur. Şekil 4.30' dan farklı olarak burada kesme hızının serlik değerlerine etkisi incelenmiştir. Kesme hızının 20 m/dak dan 70 m/dak ya çıkması sonucu tüm kesme koşullarında sertlik değerlerinde artışlar yaşanmış ancak bu sertlik değerleri daha düşük olmuştur. Bu durum kesme hızının artışıyla beraber takım-iş parçası arasında ki sürtünme katsayısının artmasına bağlı olarak kesme bölgesinde artan kesme sıcaklığının malzemede oluşturduğu termal yumuşama etkisinden kaynaklanmaktadır. En yüksek sertlik değeri 365 HV ile CO_2 koşulunda ölçülmüş olup, işlenmemiş malzeme sertliğine kıyasla arada %24 lük bir fark vardır. Kesme sıvısı ve HPC koşullarında meydana gelen sertlik artışları hemen hemen aynı olup, sırasıyla 351 ve 346 HV değerleri ile işlenmemiş malzeme sertliğine kıyasla arada % 18 lik bir fark söz konusudur. En az sertlik artışı ise yine kuru kesme koşulunda 334 HV sertlik değeri ile gerçekleşmiş olup, malzemenin sertlik değerinde ki artış oranı %13 olmuştur.



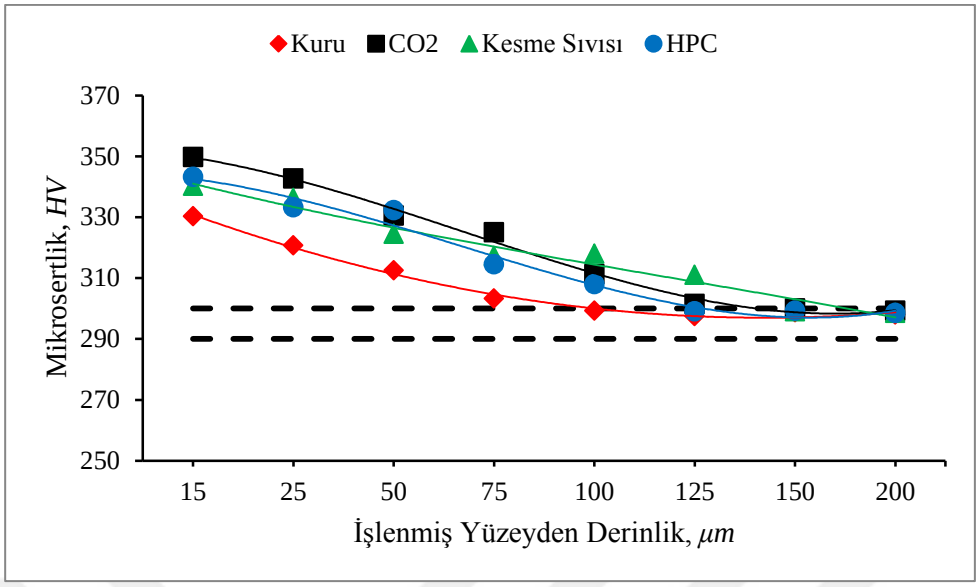
Şekil 4.31. Farklı kesme koşullarında 70 m/dak kesme hızında yapılan talaş kaldırma operasyonlarında işlenmiş yüzeyden itibaren mikrosertlik değişimleri (f=0.08 mm/dev)

Şekil 4.32' de 20 m/dak kesme hızında ve 0.16 mm/dev ilerleme değerinde farklı kesme koşullarında yapılan talaş kaldırma operasyonlarında işlenmiş malzemenin mikrosertlik değerlerinde meydana gelen değişimler gösterilmiştir. Bura da Şekil 4.30 da sunulan sertlik değerlerine kıyasla artan ilerleme değerinin mikrosertlik değerleri üzerindeki etkisinden bahsetmek mümkündür. Genel eğilim olan tüm kesme koşullarında pekleşme eğilimi, ilerleme değerinin artmasıyla devam etmiştir. Ancak sertlik değerlerinde artış mevcut olmasıyla birlikte, bu artışlar düşük ilerleme değerine kıyasla daha az olmuştur. Bu durum ilerleme değerinin artmasıyla birlikte talaş kesit alanın artması sonucu, kesme operasyonu sırasında oluşan ısının artışından dolayı iş parçası üzerinde artan termal etkiler ile açıklanabilir. Nitekim önceki bölümde sunulan kesme sıcaklığı değerleri de ilerleme değerinin artışıyla sıcaklığın arttığını göstermektedir. En çok sertlik değeri 358 HV ile CO_2 koşulunda ölçülmüş olup onu sırasıyla 352 HV ile HPC koşulu ve 349 HV ile kesme sıvısı koşulu takip etmiş olup, işlenmemiş malzeme sertliğine kıyasla arada ortalama %18 lik artış söz konusudur. En az sertlik artışının meydana geldiği kuru kesme koşulunda ise 334 HV ile %13 lük bir artış olmuştur.



Şekil 4.32. Farklı kesme koşullarında 20 m/dak kesme hızında yapılan talaş kaldırma operasyonlarında işlenmiş yüzeyden itibaren mikrosertlik değişimleri (f=0.16 mm/dev)

Şekil 4.32' de 70 m/dak kesme hızı ve 0.16 m/dev ilerlme değerinde yapılan talaş kaldırma operasyonlarında iş parçasının mikrosertlik değerlerinde meydana gelen değişimler sunulmuştur. En çok sertlik artışı 350 HV ile CO_2 koşulunda gerçekleşmiş olup, işlenmemiş malzeme sertliğine kıyasla arada %18 lik artış vardır. HPC koşulunda 343 HV ve kesme sıvısı koşulunda 340 HV sertlik değerleri ölçülmüştür. Kuru kesme koşulunda ölçülen sertlik değeri 330 HV olup, sertlik artış oranı %12 dir.



Şekil 4.33. Farklı kesme koşullarında 70 m/dak kesme hızında yapılan talaş kaldırma operasyonlarında işlenmiş yüzeyden itibaren mikrosertlik değişimleri (f=0.16 mm/dev)

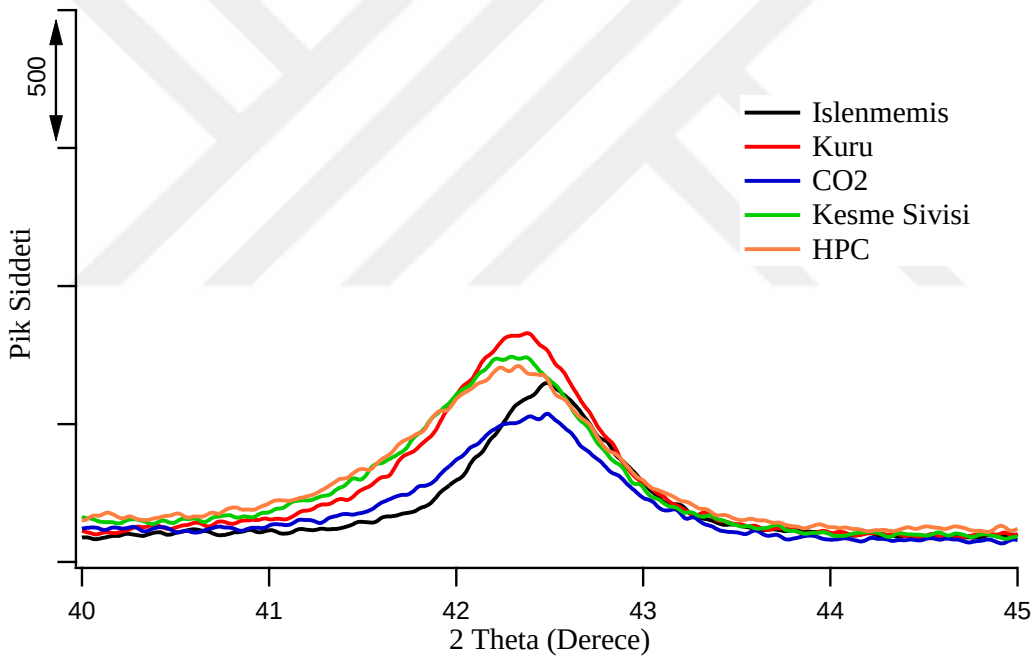
4.11 XRD Faz Analizi

Bu bölümde talaşlı imalatı gerçeklşetirilmiş NiTi alaşım malzemelerin XRD analizleri incelenmiştir. XRD analizi, mikroyapıda meydana gelen tane küçülmesi olayları veya işlenmiş yüzeylerin mikrosertlik değerlerinde meydana gelen değişimlerin yorumlanmasında yol gösterici olmasının yanı sıra işlenmiş malzemede meydana gelen olası faz dönüşümleri analiz etmede kullanılan etkin bir yöntemdir. XRD analizinde, elde edilen şekillerin yorumlanmasında ana parametreler, piklerin şiddetlerinde ve genişliklerinde meydana gelen daralma/genişleme ve kaymalardır. Literatürde farklı mühendislik malzemeleri ve NiTi alaşım malzemesinin yapılan XRD analizlerinde, piklerin genişliğinin artması ve pik açısının kayması, kristal yapıda tane küçülmesine işaret olarak yorumlanmıştır [32, 36, 56].

Şekil hafızalı alaşımda, kesme sırasında oluşan aşırı sıcaklık, malzemenin martenzit fazının östenite dönüşmesine yol açar ancak talaş kaldırma operasyonu sonrası soğuyup oda sıcaklığına geri dönen malzeme östenitten martenzite geri dönüşür. Aynı zamanda malzemeye etki eden mekanik gerilmelerde malzemenin faz dönüşüm özelliği

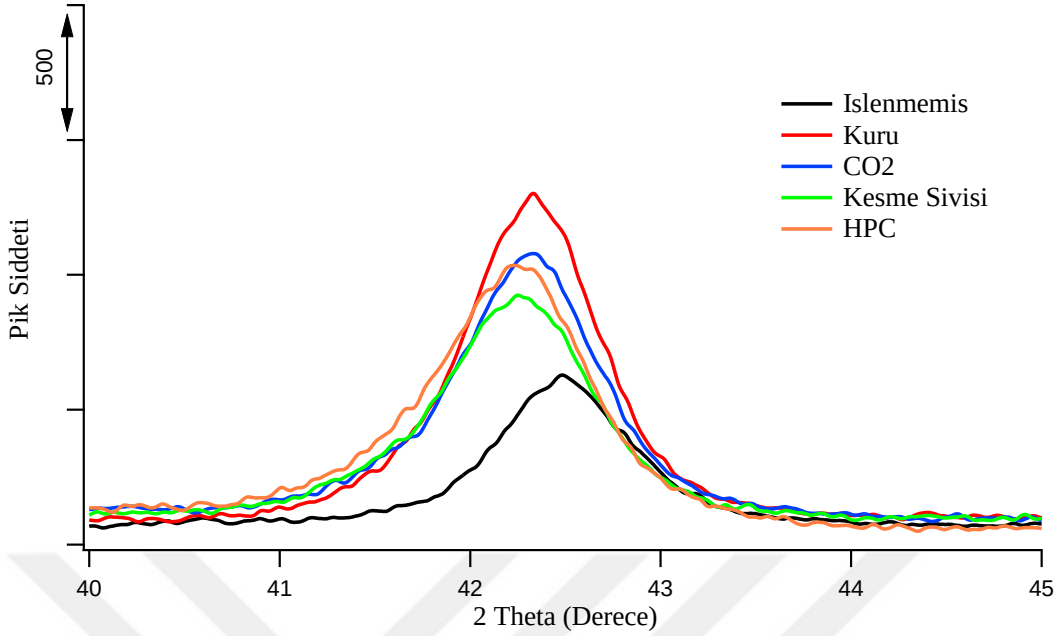
tetiklemektedir. NiTi alaşımın şekil hafıza özelliğinden dolayı faz analizinin iyi anlaşılması gerekmektedir. Bu hususta 42-43° aralığında bulunan ana pik incelenmiştir.

Şekil 4.34' te farklı kesme koşullarında 20 m/dak kesme hızı ve 0.08 mm/dev ilerleme değerinde gerçekleştirilen talaş kaldırma operasyonu sonrası elde edilen XRD profilleri sunulmuştur. Şekilde görüleceği üzere işlenmemiş malzemenin XRD profili ile kıyaslandığında tüm kesme koşullarının XRD profillerinin açılarında kaymalar mevcuttur. Bu durum işlenmiş malzmelerin yüzey bölgelerinde meydana gelen plastik deformasyon olayını açıklamaktadır. Burada dikkat çeken husus işlenmemiş malzemenin 35, 38.5, 47 ve 48° açılarında oluşan martenzit piklerinin, talaşlı imalat sonrası yok olduğudur. Bu durumda işlenmemiş malzemenin sahip olduğu martenzit faz yoğunluğunun, talaş kaldırma operasyonuyla azaldığı görülmektedir.



Şekil 4.34. Farklı kesme koşullarında yapılan talaş kaldırma operasyonu sonrası elde edilen XRD profilleri (Vc=20 m/dak, f=0.08 mm/dev)

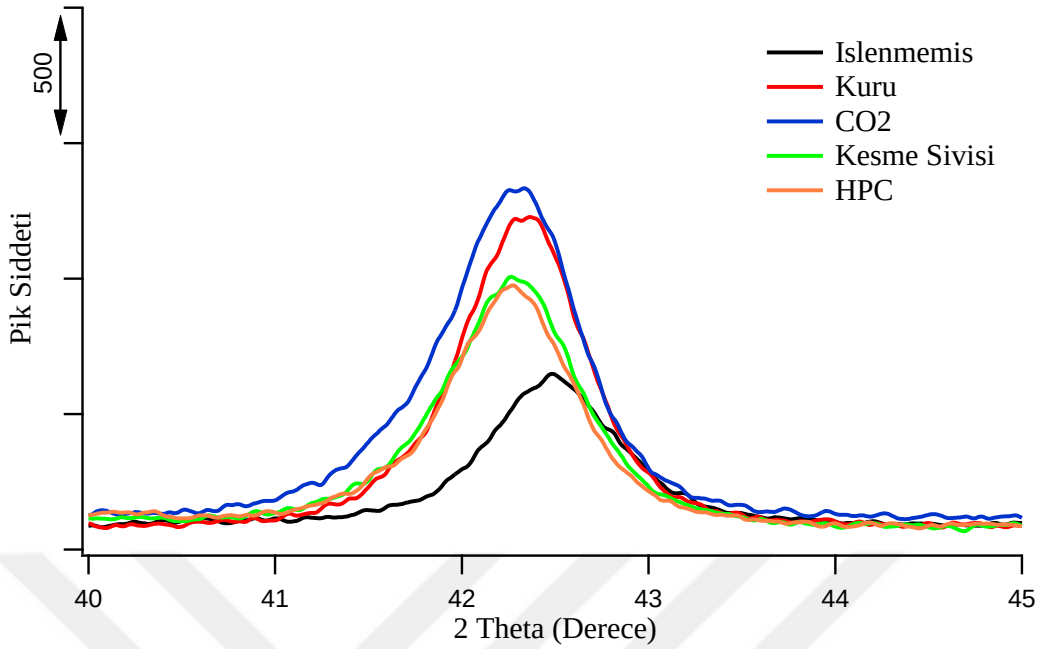
Farklı kesme koşullarında 45 m/dak ve 0.08 mm/dev ilerleme değerinde yapılan talaş kaldırma operasyonunda elde edilen XRD profilleri Şekil 4.35' te sunulmuştur. Görüleceği üzere işlenmemiş malzemeyle kıyaslandığında, işlenmiş malzmelerin pik açılarında kaymalar ve pik genişlemeleri bariz şekilde gerçekleşmiştir. Bir diğer önemli husus, ana pikin östenit yapıda olduğudur.



Şekil 4.35. Farklı kesme koşullarında yapılan talaş kaldırma operasyonu sonrası elde edilen XRD profilleri (Vc=45 m/dak, f=0.08 mm/dev)

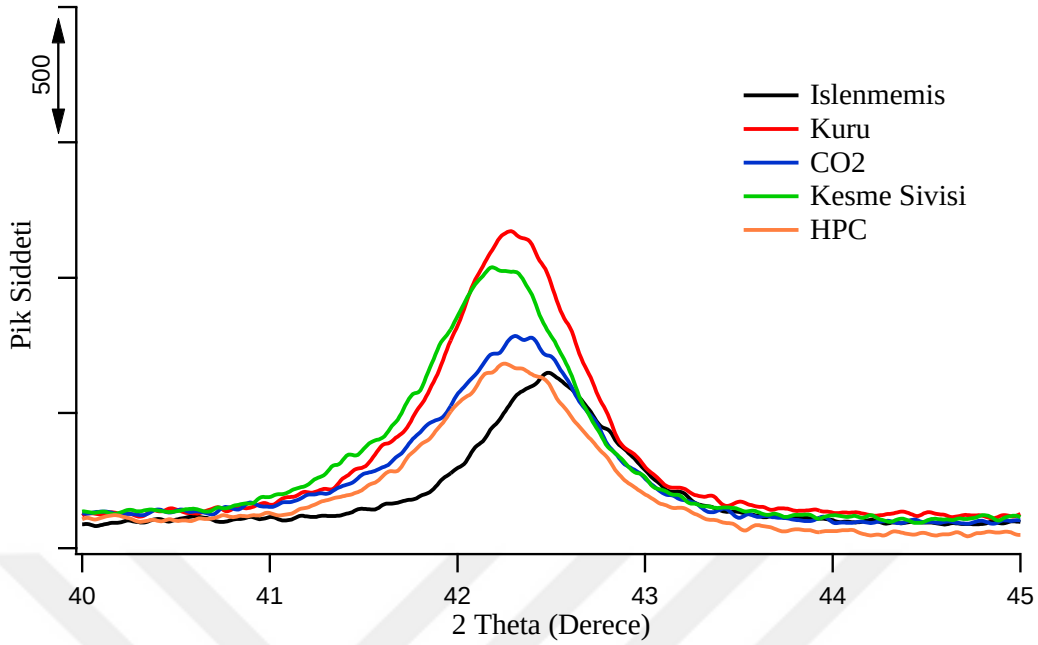
Şekil 4.36' da farklı kesme koşullarında 70 m/dak kesme hızı ve 0.08 mm/dev ilerleme değerinde yapılan talaş kaldırma operasyonu sonrası elde edilen XRD profilleri sunulmuştur. Burada da işlenmemiş malzeme piki ile kıyaslandığında, işlenmiş malzemelerin pik açılarında kaymalar meydana geldiği ve piklerde de genişlemelerin oluştuğu açık şekilde görülmektedir. Ana östenit pik dışında başka martenzit bir yapının var olmadığı görülmektedir.

Aslında talaş kaldırma operasyonu sonrası östenit fazı dışında martenzit fazına ait piklerin oluşması için çok düşük sıcaklıklarda talaş kaldırma operasyonu yapılması gerekmektedir. Bu sıcaklık öyle ki, işlenen malzemenin martenzit sıcaklığının altında olmalıdır. Yapılan deneylerde, NiTi malzemenin martenzit sıcaklığının altına inilememiştir. Oysa ki literatürde sıvı azot ile yapılan kriyojenik koşulda talaş kaldırma operayonlarında, malzemenin çok düşük sıcaklıklarda işlenmesi sonucu, ana östenit pik dışında martenzit piklerin de oluştuğu görülmektedir [32]. Bu çalışmada kriyojenik olarak uygulanan CO_2 ise, kesme deneyleri sırasında oluşan sıcaklığı azaltmakla beraber, malzemenin martenzit sıcaklıklarda kalamayacak kadar yüksek sıcaklıklarda işlenmesine neden olmuştur.



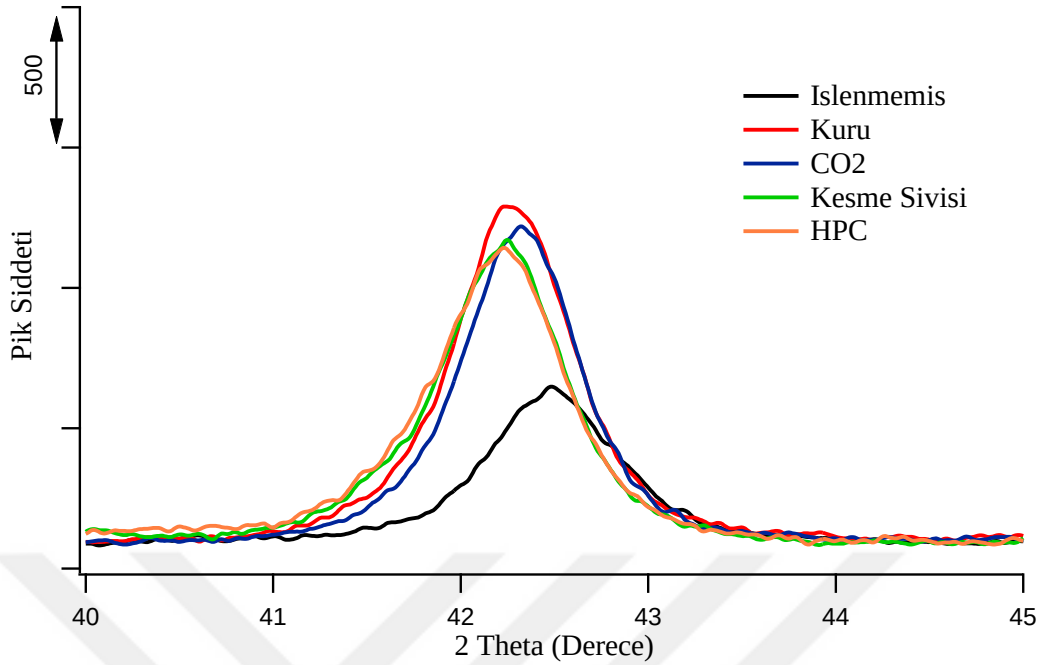
Şekil 4.36. Farklı kesme koşullarında yapılan talaş kaldırma operasyonu sonrası elde edilen XRD profilleri (Vc=70 m/dak, f=0.08 mm/dev)

Farklı kesme koşullarında 20 m/dak kesme hızı ve 0.16 mm/dev ilerleme değerinde yapılan talaş kalrdırma deneylerinde elde edilen XRD profilleri Şekil 4.37' de sunulmuştur. Görüleceği üzere ilerleme değerinin iki katına çıkarılmasıyla beraber, diğer kesme parametre ve koşulları aynı kalmak koşuluyla, XRD pik şiddetlerinde bariz artışların mevcut olduğu, yine pik açılarında kaymaların meydana geldiği ve genişlemelerin olduğu açık şekilde görülmektedir. Bu durum artan ilerleme değeri nedeniyle artan talaş kesit alanı dolayısıyla artan deformasyon oranına atfedilebilir. Ancak daha önce sunulan sertlik değerleri gözönüne alındığında ilerlemenin artmasıyla sertlik değerlerinin daha düşük olduğu ve bu durumda artan kesme sıcaklığının plastik deformasyonu yok edici etkisinin, mekanik etkilerden daha baskın bir etmen olduğu ifade edilebilir.

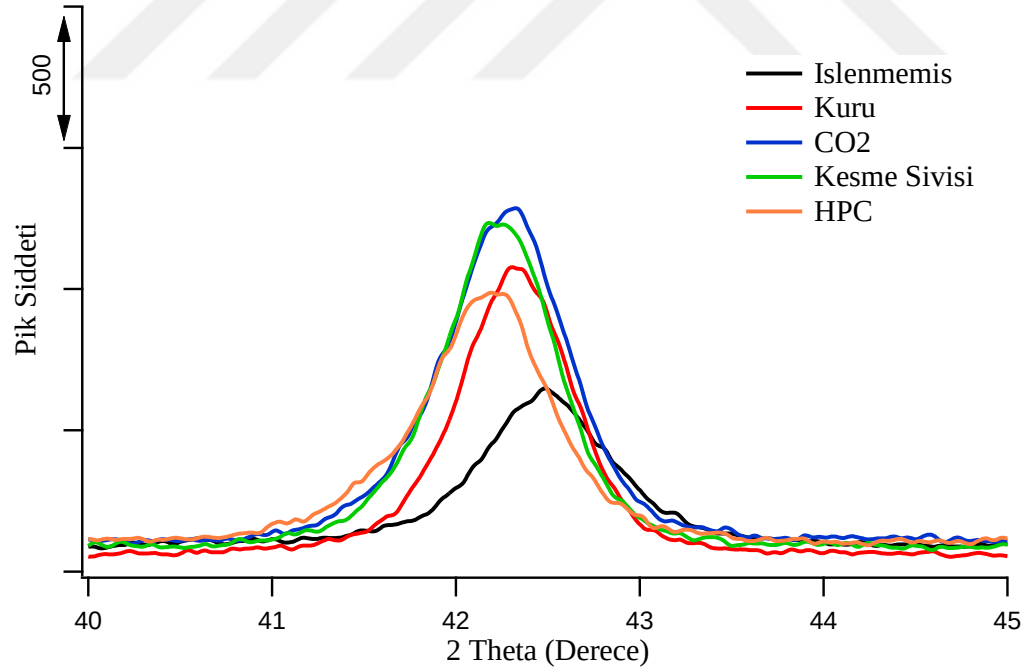


Şekil 4.37. Farklı kesme koşullarında yapılan talaş kaldırma operasyonu sonrası elde edilen XRD profilleri (Vc=20 m/dak, f=0.16 mm/dev)

Şekil 4.38' de farklı kesme koşullarında 45 m/dak kesme hızı ve 0.16 mm/dev ilerleme değerinde yapılan talaş kaldırma operasyonları sonrası elde edilen XRD profilleri sunulmuştur. Ana östenit piki incelendiğinde, işlenemmiş malzemeye oranla, işlenmiş malzemelerin pik şiddetlerinde kaymalar ve genişlemeler açıktır. Aynı durum, farklı kesme koşulları ve 70 m/dak kesme hızı ve 0.16 mm/dev ilerleme değerinde yapılan talaş kaldırma operasyonlarında elde edilen XRD profilleri içinde geçerlidir (Şekil 4.39).



Şekil 4.38. Farklı kesme koşullarında yapılan talaş kaldırma operasyonu sonrası elde edilen XRD profilleri (Vc=45 m/dak, f=0.16 mm/dev)



Şekil 4.39. Farklı kesme koşullarında yapılan talaş kaldırma operasyonu sonrası elde edilen XRD profilleri (Vc=70 m/dak, f=0.16 mm/dev)

Farklı kesme parametrelerinde yapılan deneyler sonucu elde edilen XRD profilleri incelendiğinde, genel eğilimin piklerde genişlemeler oluştuğu ve pik açılarının

değiştiğidir. Bu durum daha önceki bölümlerde sunulan sertlik değerlerinin talaşlı imalatın etkisiyle artmasını ve mikroyapılarda işlenmiş yüzeylerde artan ikizlenmiş yapıları destekleyeci niteliktedir. Ayrıca, işlenmemiş malzeme XRD profilinde bulunan martenzit (B19) piklerinin, talaşlı imalat sonrası yok olduğu ve sadece ana pik olan östenit (B2) pikinin kaldığı görülmektedir.

5. SONUÇLAR

Bu tezde, uzay, havacılık ve biyomedikal sektöründe kullanılan ve ticari olarak en çok tercih edilen şekil hafızalı alaşım olan NiTi alaşım malzemesinin ısıl işlem sonrası talaşlı imalat performansı ve yüzey bütünlüğü karakteristikleri incelenmiştir.

Yapılan deneylerde farklı kesme hızları ve ilerleme değerlerinin yanı sıra sabit kesme derinliğinde talaş kaldırma operasyonları gerçekleştirilmiş olup, işleme performansını iyileştirme çalışmaları kapsamında CO_2, yüksek basınçlı soğutma ve kesme sıvısı kullanılmış ve elde edilen datalar kuru kesme ile kıyaslanmıştır.

Elde edilen bulgular, işleme performansı kriterleri olan kesme kuvvetleri, kesme sıcaklığı, kesici takım aşınması, talaş kırılabilirliği parametreleri olarak incelenmiştir. Yüzey bütünlüğü analizi kapsamında ise işlenmiş NiTi alaşımın yüzey püğrüzlülüğü, mikrosertliği, mikroyapısında meydana gelen değişimler ve XRD analizi yapılmıştır. Yapılan çalışmalar sonucu elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibidir;

- ✓ İlerleme değerinin artmasıyla kesme kuvvetleri de artış göstermiştir. 0.08 mm/dev ilerleme değerinde esas kesme kuvvetlerinde net bir trend oluşmazken, 0.16 mm/dev ilerleme değerinde kesme hızının artmasıyla esas kesme kuvvetlerinde azalma meydana gelmiştir.
- ✓ Kuru kesme koşulunda talaş kaldırma operasyonu sırasında ölçülen kesme sıcaklıklarına oranla CO_2 koşulunda efektif bir soğutma sağlanmıştır. Kuru kesme koşulunda 0.16 mm/dev ilerleme değeri ve 70 m/dak kesme hızında ölçülen en yüksek kesme sıcaklığına kıyasla, aynı kesme parametrelerinde CO_2 koşulunda ölçülen sıcaklık 4 kat daha azdır.
- ✓ Kesici takım serbest yüzey aşınması incelendiğinde, kesme hızının artmasıyla aşınma miktarının da arttığı görülmüştür. Özellikle 0.08 mm/dev ilerleme değerinde belirgin olmamakla beraber, 0.16 mm/dev ilerleme değerinde serbest

yüzey aşınmalarının yanında bariz çentik aşınması oluşumları meydana gelmiştir.

- ✓ Kesici takım üzerinde en az takım-talaş temas alanı tüm kesme parametrelerinde, talaşı kırıcı ve kesme alanından uzaklaştırıcı etki göstermesi nedeniyle HPC koşulunda oluşmuştur.
- ✓ Deneylerde elde edilen talaşlar incelendiğinde, CO_2 ve kesme sıvısı koşullarında düşük kesme hızlarında genelde kırıklı ve toz halde talaşlar oluşurken, kesme hızının artmasıyla daha sürekli talaşlar oluşmuştur. Kuru kesmede tüm kesme parametrelerinde sürekli talaş oluşurken, HPC koşulunda ise tüm kesme parametrelerinde kırıklı ve toz formunda talaşlar oluşmuştur.
- ✓ İşlenmiş malzemelerin yüzey pürüzlülükleri, kesici takım aşınmasına bağlı olarak kesme hızının artmasıyla azalma eğilimi göstermiştir. Yalnız HPC koşulunda 70 m/dak kesme hızında yüksek pürüzlülük değerleri eğilimi bozucu etki yapmıştır.
- ✓ Tüm kesme koşulları ve parametrelerinde işlenmiş numunelerin sertlik değerleri, işlenmemiş malzeme sertliğine kıyasla artış göstermiştir. Özellikle soğutucu etkisinden dolayı CO_2 koşulunda en yüksek sertlik değerleri ölçülmüş olup, 0.08 mm/dev ilerleme değeri ve 20 m/dak kesme hızında bu oran %36 olmuştur.
- ✓ İşlemiş malzemelerin mikroyapı görüntülerinde, yüzeye yakın yerlerde plastik deformasyondan kaynaklı ikizlenmiş yapıların yoğunluğu artmıştır.. Bu durum malzemede yüzeye yakın yerlerde tane sınırını artırıcı etki(tane küçülmesi) yapmış ve dolayısyla sertlik değerlerinde artış meydana gelmiştir.
- ✓ XRD analizinde işlenmemiş malzemede bulunan martenzit pikler, talaşlı imalat sonrası yok olmuştur. İncelemesi yapılan ana östenit piklerinde, işlenmemiş malzemeyle kıyaslandığında, işlenmiş malzemelerin pik açılarında kristal yapıdaki değişimler dolayısıyla kaymalar ve tane küçülmesi dolayısıyla da pik genişlemesi meydana gelmiştir.

KAYNAKLAR

1. Bhattacharya, K., Microstructure of martensite: why it forms and how it gives rise to the shape-memory effect. Vol. 2. 2003: Oxford University Press.
2. Lagoudas, D.C., Shape memory alloys: modeling and engineering applications. 2008: Springer Science & Business Media.
3. Otsuka, K. ve C.M. Wayman, Shape memory materials. 1999: Cambridge university press.
4. Velmurugan, C., V. Senthilkumar, S. Dinesh, ve D. Arulkirubakaran, Machining of NiTi-shape memory alloys-A review. Machining Science and Technology, 2018. 22(3): p. 355-401.
5. Pfeifer, R., C.W. Müller, C. Hurschler, S. Kaierle, V. Wesling, ve H. Haferkamp, Adaptable orthopedic shape memory implants. Procedia CIRP, 2013. 5: p. 253-258.
6. Chang-Jun, Q., M. Pei-Sun, ve Y. Qin, A prototype micro-wheeled-robot using SMA actuator. Sensors and Actuators A: Physical, 2004. 113(1): p. 94-99.
7. Dolce, M. ve D. Cardone, Mechanical behaviour of shape memory alloys for seismic applications 1. Martensite and austenite NiTi bars subjected to torsion. International Journal of Mechanical Sciences, 2001. 43(11): p. 2631-2656.
8. Higgins, R.A. ve R.A. Higgins, Engineering metallurgy: Applied physical metallurgy. 1993: Edward Arnold.
9. Ball, P., Made to measure: New materials for the 21st century. 1999: Princeton University Press.
10. Duerig, T. ve K. Melton, Applications of Shape Memory in the USA. New Materials and Processes for the Future, 1989: p. 195-200.
11. Wanhill, R. ve B. Ashok, Shape Memory Alloys (SMAs) for Aerospace Applications, in Aerospace Materials and Material Technologies. 2017, Springer. p. 467-481.
12. Motahari, S., M. Ghassemieh, ve S. Abolmaali, Implementation of shape memory alloy dampers for passive control of structures subjected to seismic excitations. Journal of Constructional Steel Research, 2007. 63(12): p. 1570-1579.
13. Duerig, T.W., K. Melton, ve D. Stöckel, Engineering aspects of shape memory alloys. 2013: Butterworth-Heinemann.
14. Mihálcz, I., Fundamental characteristics and design method for nickel-titanium shape memory alloy. Periodica Polytechnica Mechanical Engineering, 2001. 45(1): p. 75-86.
15. Gorbet, R.B., A study of the stability and design of shape memory alloy actuators. 1995: Citeseer.

16. Kaynak, Y., H. Karaca, ve I. Jawahir. Cryogenic machining of NiTi shape memory alloy. in 6th International Conference and Exhibition on Design and Production of Machines and Dies/Molds. 2011.

17. Kaynak, Y., T. Lu, ve I. Jawahir, Cryogenic machining-induced surface integrity: a review and comparison with dry, MQL, and flood-cooled machining. Machining Science and Technology, 2014. 18(2): p. 149-198.

18. Griffiths, B., Manufacturing surface technology: surface integrity and functional performance. 2001: Elsevier.

19. Hassan, M., M. Mehrpouya, ve S. Dawood, Review of the machining difficulties of nickel-titanium based shape memory alloys. Applied Mechanics and Materials, 2014. 564: p. 533.

20. Lin, H., K. Lin, ve Y. Chen, A study on the machining characteristics of TiNi shape memory alloys. Journal of materials processing technology, 2000. 105(3): p. 327-332.

21. Jawahir, I., E. Brinksmeier, R. M'saoubi, D. Aspinwall, J. Outeiro, D. Meyer, D. Umbrello, ve A. Jayal, Surface integrity in material removal processes: Recent advances. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2011. 60(2): p. 603-626.

22. Guo, Y., A. Klink, C. Fu, ve J. Snyder, Machinability and surface integrity of Nitinol shape memory alloy. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2013. 62(1): p. 83-86.

23. Weinert, K., V. Petzoldt, ve D. Kötter, Turning and drilling of NiTi shape memory alloys. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2004. 53(1): p. 65-68.

24. Weinert, K. ve V. Petzoldt, Machining of NiTi based shape memory alloys. Materials Science and Engineering: A, 2004. 378(1-2): p. 180-184.

25. Weinert, K. ve V. Petzoldt, Machining NiTi micro-parts by micro-milling. Materials Science and Engineering: A, 2008. 481: p. 672-675.

26. Gaikwad, V. ve V.S. Jatti, Optimization of material removal rate during electrical discharge machining of cryo-treated NiTi alloys using Taguchi's method. Journal of King Saud University-Engineering Sciences, 2016.

27. Akbari, J., A. Chegini, A. Rajabnejad, ve A. Ave. Ultrasonic-assisted turning of NiTi shape memory alloy. in International Conference and Exhibition on Design and Production of Machines and Dies/Molds. 2009.

28. Huang, H., H. Zhang, L. Zhou, ve H. Zheng, Ultrasonic vibration assisted electro-discharge machining of microholes in Nitinol. Journal of micromechanics and microengineering, 2003. 13(5): p. 693.

29. Kaynak, Y., H. Karaca, R. Noebe, ve I. Jawahir, Tool-wear analysis in cryogenic machining of NiTi shape memory alloys: A comparison of tool-wear performance with dry and MQL machining. Wear, 2013. 306(1): p. 51-63.

30. Kaynak, Y., S. Robertson, H. Karaca, ve I. Jawahir, Progressive tool-wear in machining of room-temperature austenitic NiTi alloys: The influence of cooling/lubricating, melting, and heat treatment conditions. Journal of Materials Processing Technology, 2015. 215: p. 95-104.

31. Kaynak, Y., H. Karaca, R. Noebe, ve I. Jawahir, Analysis of tool-wear and cutting force components in dry, preheated, and cryogenic machining of NiTi shape memory alloys. Procedia CIRP, 2013. 8: p. 498-503.

32. Kaynak, Y., Machining and phase transformation response of room-temperature austenitic NiTi shape memory alloy. Journal of materials engineering and performance, 2014. 23(9): p. 3354-3360.

33. Kaynak, Y., H. Tobe, R. Noebe, H. Karaca, ve I. Jawahir, The effects of machining on the microstructure and transformation behavior of NiTi Alloy. Scripta Materialia, 2014. 74: p. 60-63.

34. Field, M., J.F. Kahles, ve J. Cammett, Review of measuring methods for surface integrity. CIRP, 1972. 21(2): p. 219-238.

35. Ulutan, D. ve T. Ozel, Machining induced surface integrity in titanium and nickel alloys: A review. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2011. 51(3): p. 250-280.

36. Kaynak, Y., B. Huang, H. Karaca, ve I. Jawahir, Surface Characteristics of Machined NiTi Shape Memory Alloy: The Effects of Cryogenic Cooling and Preheating Conditions. Journal of Materials Engineering and Performance, 2017. 26(7): p. 3597-3606.

37. Kaynak, Y., H. Karaca, ve I. Jawahir, Cutting speed dependent microstructure and transformation behavior of NiTi alloy in dry and cryogenic machining. Journal of Materials Engineering and Performance, 2015. 24(1): p. 452-460.

38. Weinert, K. ve V. Petzoldt, Machining of NiTi based shape memory alloys. Materials Science and Engineering: A, 2004. 378(1): p. 180-184.

39. Weinert, K., V. Petzoldt, D. Kötter, ve M. Buschka, Drilling of NiTi shape memory alloys. Materialwissenschaft und Werkstofftechnik: Entwicklung, Fertigung, Prüfung, Eigenschaften und Anwendungen technischer Werkstoffe, 2004. 35(5): p. 338-341.

40. Kaynak, Y., H. Karaca, ve I. Jawahir. Sustainability evaluation in machining of NiTi shape memory alloy. in 1st international Conference on Sustainable Life in Manufacturing (SLIM 2010). 2010.

41. Campo, K., D. Andrade, V. Opini, M. Mello, E. Lopes, ve R. Caram, On the hardenability of Nb-modified metastable beta Ti-5553 alloy. Journal of Alloys and Compounds, 2016. 667: p. 211-218.

42. Merchant, M.E., Mechanics of the metal cutting process. I. Orthogonal cutting and a type 2 chip. Journal of applied physics, 1945. 16(5): p. 267-275.

43. Hong, S.Y., Y. Ding, ve J. Jeong, Experimental evaluation of friction coefficient and liquid nitrogen lubrication effect in cryogenic machining. Machining Science and Technology, 2002. 6(2): p. 235-250.

44. Oraby, S. ve D. Hayhurst, Development of models for tool wear force relationships in metal cutting. International journal of mechanical sciences, 1991. 33(2): p. 125-138.

45. Sulaiman, S., A. Roshan, ve S. Borazjani. Effect of cutting parameters on tool-chip interface temperature in an orthogonal turning process. in Advanced Materials Research. 2014. Trans Tech Publ.

46. Carvalho, S., S.L. e Silva, A. Machado, ve G. Guimaraes, Temperature determination at the chip–tool interface using an inverse thermal model considering the tool and tool holder. Journal of Materials Processing Technology, 2006. 179(1-3): p. 97-104.

47. Abhang, L. ve M. Hameedullah, Chip-tool interface temperature prediction model for turning process. International Journal of Engineering Science and Technology, 2010. 2(4): p. 382-393.

48. Ezugwu, E., J. Bonney, D. Fadare, ve W. Sales, Machining of nickel-base, Inconel 718, alloy with ceramic tools under finishing conditions with various coolant supply pressures. Journal of Materials Processing Technology, 2005. 162: p. 609-614.

49. Shaw, M.C. ve J. Cookson, Metal cutting principles. 1984: Clarendon press Oxford.

50. PalDey, S. ve S. Deevi, Single layer and multilayer wear resistant coatings of (Ti, Al) N: a review. Materials Science and Engineering: A, 2003. 342(1-2): p. 58-79.

51. Lee, M., High temperature hardness of tungsten carbide. Metallurgical Transactions A, 1983. 14(8): p. 1625-1629.

52. Ranganath, M., Vipin, Effect of Rake Angle on Surface Roughness in CNC Turning. International Journal of Advance Research and Innovation, 2014. 2: p. 522-530.

53. Zener, C. ve J.H. Hollomon, Effect of strain rate upon plastic flow of steel. Journal of Applied physics, 1944. 15(1): p. 22-32.

54. Quan, Y. ve B. Ye, The effect of machining on the surface properties of SiC/Al composites. Journal of Materials Processing Technology, 2003. 138(1-3): p. 464-467.

55. Jawahir, I., Z. Pu, S. Yang, G. Rotella, Y. Kaynak, T. Lu, A. Deshpande, D. Umbrello, ve O. Dillon Jr. Cryogenic processing of materials for enhanced product life, performance and sustainability. in Proc. of 15th International Conference on Advances in Materials and Processing Technologies, Wollongong, Australia. 2012.

56. Jia, Q. ve D. Gu, Selective laser melting additive manufacturing of Inconel 718 superalloy parts: Densification, microstructure and properties. Journal of Alloys and Compounds, 2014. 585: p. 713-721.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Özhan Kıtay

Doğum Yeri ve Tarihi : Bakırköy/ 10.05.1992

İletişim : ozhankitay@hotmail.com

EĞİTİM BİLGİLERİ

Yüksek Lisans :Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Bölümü (2017-2018)

Lisans :Karabük Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği(İNGİLİZCE) Bölümü (2011-2016)

PROJELER

"Şekil Hafızalı NitiHf Malzemelerin Talaşlı İmalatı-Yüzey Bütünlüğü-Ürün Performansı Arasındaki İlişkisinin Araştırılması", Destekleyen Kuruluş: TÜBİTAK ARDEB (TÜBİTAK-1001 Projesi), NASA Glenn Research Center, ABD, Görev: Proje Bursiyeri, Proje NO: 116M346

"Şekil Hafızalı Alaşımların Talaşlı İmalatı Sonrası Yüzey Bütünlüğü Karakteristiklerinin İncelenmesi", Destekleyen Kuruluş: Marmara Üniversitesi BAP Projesi, Görev: Proje Araştırmacısı, Proje NO: FEN-C-YLYP 150218-0061

"Çevreye Duyarlı Plastik Geri Dönüşüm Makinesi - B:Parçalanan Plastikleri Eleme Ünitesi Tasarım Ve İmalatı" Destekleyen Kuruluş TÜBİTAK 2241/A (2016), Görev: Proje Araştırmacısı, Proje NO: 1139B411503243

"Broşlama Yöntemiyle Çentik Açma Makinası Tasarımı Ve İmalatı" Destekleyen Kuruluş: TÜBİTAK 2209/A (2015), Görev: Proje Yürütücüsü, Proje NO: 1919B011403139

YAYINLAR

- Kıtay, Ö., Bozkurt, A., Kaynak, Y. (2018) Farklı Soğutucuların Inconel 718 Alaşımının İşlenebilme Performansına Etkisinin Araştırılması, 9th International Symposium on Machining, Antalya, Turkey
- Kıtay, Ö., Taşcıoğlu, E., Kaş, M., Nesli Ş., Kaynak, Y., Yılmaz, O. (2018) Seçici Lazerle Ergitme Yöntemi İle Üretilen Inconel 625 Alaşımlı Parçada Yüzey Bütünlüğünün İncelenmesi, UMTIK 2018, Eskişehir, Turkey
- Kıtay, Ö., Kaynak, Y. (2018) Şekil Hafızalı NiTi Alaşımın Kuru, MQL ve Kriyojenik Koşullarda İşlenmesinde Kesici Takım Aşınmasıyla İş Parçası Yüzey Kalitesi Arasındaki İlişkinin Araştırılması, UMTIK 2018, Eskişehir, Turkey
- Kaynak, Y., Kıtay, Ö. (2018) Porosity, Surface Quality, Microhardness and Microstructure of Selective Laser Melted 316L Stainless Steel Resulting from Finish Machining, Journal of Manufacturing and Materials Processing,2(2), 36, P.1-12. https://doi.org/10.3390/jmmp2020036
- Kıtay, Ö., Kırmacıoğlu, K.E., Kaynak, Y. (2017) P20 Takım Çeliğinin Karbondioksit Yardımlı Talaşlı İmalat Performansının Değerlendirilmesi, 8th International Symposium on Machining, Antalya, Turkey.
- Dengiz, M., Sarıçan, Ö., Kıtay, Ö., Taşcıoğlu, E., Kaynak, Y. (2017) 316LVM Paslanmaz Çelik Malzemesinin Talaşlı İmalat Ve Yüzey Bütünlüğü Analizi, 8th International Advanced Technologies Symposium, Elazığ, Turkey.