



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.org.tr/politeknik>



Ti-6Al-4V alaşımasının mikro cep frezeleme işleminde ısıtma işlemi, soğutma koşulları ve takım giriş stratejilerinin çapak genişliği, takım aşınması ve yüzey kalitesi üzerine etkileri

Effects of heat treatment, cooling conditions and tool entry strategies on burr width, tool wear and surface quality in micro-pocket milling of ti-6al-4v alloy

Yazar(lar) (Author(s)): Elif MALYER

ORCID: 0000-0001-9041-3842

To cite to this article: Malyer E., “Ti-6Al-4V Alaşımasının Mikro Cep Frezeleme İşleminde Isıtma İşlemi, Soğutma Koşulları ve Takım Giriş Stratejilerinin Çapak Genişliği, Takım Aşınması ve Yüzey Kalitesi Üzerine Etkileri”, *Journal of Polytechnic*, 29(3):290326:1-10 (2026).

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz: Malyer E., “Ti-6Al-4V Alaşımasının Mikro Cep Frezeleme İşleminde Isıtma İşlemi, Soğutma Koşulları ve Takım Giriş Stratejilerinin Çapak Genişliği, Takım Aşınması ve Yüzey Kalitesi Üzerine Etkileri”, *Politeknik Dergisi*, 29(3):290326:1-10 (2026).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.1816826

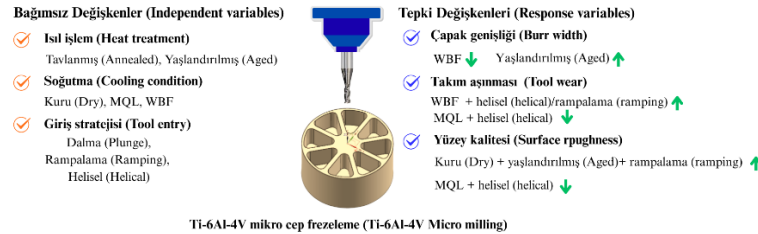
Ti-6Al-4V Alaşımının Mikro Cep Frezeleme İşleminde Isıl İşlem, Soğutma Koşulları ve Takım Giriş Stratejilerinin Çapak Genişliği, Takım Aşınması ve Yüzey Kalitesi Üzerine Etkileri

Effects of Heat Treatment, Cooling Conditions and Tool Entry Strategies on Burr Width, Tool Wear and Surface Quality in Micro-Pocket Milling of Ti-6Al-4V Alloy

Önemli noktalar (Highlights)

- ❖ Yaşlandırma, α/β faz dengesini değiştirerek sertliği ve çapak genişliğini artırmıştır. / Aging altered the α/β phase balance, increasing hardness and burr width.
- ❖ MQL ve helisel giriş, en düşük takım aşınmasını ve en iyi yüzey kalitesini sağlamıştır. / MQL with helical entry provided the lowest tool wear and best surface quality.
- ❖ WBF, bazı koşullarda çapakı azaltmış; ancak helisel/rampa girişlerde takım hasarı riskini artırmıştır. / WBF reduced burrs in some cases but increased tool damage risk with helical/ramp entries.

Grafik Özet (Graphical Abstract)



Şekil. Ti-6Al-4V mikro cep frezelemede ısıtma işlemi, soğutma ve giriş stratejisinin çapak genişliği, takım aşınması ve yüzey kalitesine etkilerinin şematik gösterimi (↑ artış, ↓ azalış). / **Figure.** Schematic illustration of the effects of heat treatment, cooling, and entry strategy on burr width, tool wear, and surface quality in Ti-6Al-4V micro-pocket milling (↑ increase, ↓ decrease).

Amaç (Aim)

Bu çalışma, Ti-6Al-4V mikro cep frezelemede ısıtma işlemi, soğutma ve giriş stratejisinin çapak genişliği, takım aşınması ve yüzey kalitesine etkisini incelemektedir. / This study examines the effect of heat treatment, cooling, and entry strategy on burr width, tool wear, and surface quality in Ti-6Al-4V micro-pocket milling.

Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

Tavlınmış ve yaşlandırılmış Ti-6Al-4V numuneler, kuru, MQL ve WBF koşullarında farklı giriş stratejileriyle mikro cep frezelenmiştir. / Annealed and aged Ti-6Al-4V specimens were micro-pocket milled under dry, MQL, and WBF conditions using different entry strategies.

Özgünlük (Originality)

Çalışma, mikro cep frezelemede ısıtma işlemi, soğutma ve giriş stratejilerinin birlikte değerlendirilmesi açısından özgündür. / This study is original in jointly evaluating heat treatment, cooling, and entry strategies in micro-pocket milling.

Bulgular (Findings)

MQL ve helisel giriş en iyi yüzey kalitesi ve en düşük aşınmayı sağlarken, yaşlandırma ve kuru işleme çapak genişliğini artırmıştır. / MQL with helical entry yielded the best surface quality and lowest wear, whereas aging and dry machining increased burr width.

Sonuç (Conclusion)

Uygun soğutma ve giriş stratejisi seçimi, Ti-6Al-4V mikro cep frezelemede yüzey bütünlüğü ve takım ömrü açısından kritik öneme sahiptir. / Selecting appropriate cooling and entry strategies is critical for surface integrity and tool life in Ti-6Al-4V micro-pocket milling.

Etik Standartların Beyanı (Declaration of Ethical Standards)

Bu çalışma etik kurul izni gerektirmemektedir. / This study does not require ethical committee approval.

Ti-6Al-4V Alaşımının Mikro Cep Frezeleme İşleminde Isıl İşlem, Soğutma Koşulları ve Takım Giriş Stratejilerinin Çapak Genişliği, Takım Aşınması ve Yüzey Kalitesi Üzerine Etkileri

Araştırma Makalesi / Research Article

Elif MALYER^{1*}

¹Turgutlu Meslek Yüksek Okulu, Makine Bölümü, Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received : 03.11.2025 ; Kabul/Accepted : 30.12.2025 ; Erken Görünüm/Early View : 04.01.2026)

ÖZ

Bu araştırma, Ti-6Al-4V alaşımının mikro cep frezeleme işlemlerinde mikroyapı, takım giriş stratejisi ve soğutma/yağlama koşullarının işleme performansına etkilerini incelemektedir. Farklı mikroyapılar oluşturmak için tavlama ve yaşlandırma ısı işlemleri uygulanmıştır. Helisel, dalma ve rampalama olmak üzere üç farklı giriş stratejisi tercih edilmiştir. DeneySEL süreç, farklı yağlama stratejilerinin işleme performansı üzerindeki etkilerini karşılaştırmalı olarak ortaya koyabilmek amacıyla; kuru kesme, minimum miktarda yağlama (MQL) ve bor-su esaslı özel bir çalışma akışkanı (WBF) kullanılan üç ayrı koşul altında yürütülmüştür. İşleme performansı yüzey pürüzlülüğü ve çapak genişliği ölçümleriyle değerlendirilmiştir. Çalışmalarda 0,6 mm çapında AlTiCrN kaplamalı mikro freze kullanılmıştır. Bulgular, MQL koşullarında en düşük takım aşınması ve en yüksek yüzey kalitesi elde edildiğini göstermiştir. Yaşlandırılmış numunelerde α -faz oranındaki artış sertliği yükseltmiş, buna karşılık çapak oluşumu belirgin biçimde artmıştır. WBF koşulları, düşük talaş yapışması sağlasa da sınırlı yağlama etkisi nedeniyle takım aşınmasını artırmıştır. Bu çalışmada deneySEL süreç, farklı yağlama stratejilerinin işleme performansı üzerindeki etkilerini karşılaştırmalı olarak ortaya koyabilmek amacıyla; kuru kesme, minimum miktarda yağlama (MQL) ve bor-su esaslı özel bir çalışma akışkanı (WBF) kullanılan üç ayrı koşul altında yürütülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Mikro frezeleme, Ti-6Al-4V, ısı işlem, takım aşınması, çapak oluşumu, yüzey kalitesi.

Effects of Heat Treatment, Cooling Conditions and Tool Entry Strategies on Burr Width, Tool Wear and Surface Quality in Micro-Pocket Milling of Ti-6Al-4V Alloy

ABSTRACT

The study focuses on evaluating how variations in microstructure, tool entry strategy, and cooling/lubrication environment affect the micro-pocket milling performance of Ti-6Al-4V alloy. Distinct microstructures were achieved through annealing and aging heat treatments. Three tool entry strategies—helical, plunge, and ramp—were utilized, while cutting was carried out under dry, minimum quantity lubrication (MQL), and a boron–water-based experimental medium (WBF). Surface roughness, burr size, and tool condition were measured to assess process performance. All trials employed a 0.6 mm AlTiCrN-coated micro end mill. Experimental observations demonstrated that MQL provided the most favorable surface finish with minimal tool degradation. In aged specimens, a higher α -phase content increased hardness but also led to greater burr formation. Although the WBF medium decreased chip adhesion, its limited lubrication capacity contributed to accelerated tool wear.

Keywords: Micro milling, Ti-6Al-4V, heat treatment, tool wear, burr formation, surface quality.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Titanyum alaşımları, kimyasal kararlılıkları, yüksek dayanım/ağırlık oranı, biyouyumlulukları ve düşük ısı iletkenlikleri nedeniyle biyomedikal, havacılık ve otomotiv endüstrilerinde giderek daha fazla kullanılmaktadır [1–5]. α + β fazlı titanyum alaşımı olan Ti-6Al-4V, sektörde yaygın kullanım alanı bulur [4].

Bu alaşımın üstün mekanik özellikleri, malzeme mikroyapısında (α + β faz oranında) değişim sağlamaya yönelik ısı işlemlerle daha da geliştirilebilmektedir [6,7].

Ancak tüm bu avantajlarına rağmen Ti-6Al-4V alaşımının işlenmesi oldukça zordur; özellikle aşırı takım aşınması ve çapak oluşumu, işlenebilirliği sınırlayan temel problemler arasında yer almaktadır [2,8,9].

Mikro mekanik parçaların talebi ve kullanım alanı her geçen gün artmaktadır. Mikro ölçekte üretim yöntemleri, yüksek boyutsal hassasiyet ve üstün yüzey kalitesi sağlamaları nedeniyle giderek daha fazla tercih edilmektedir [10–12]. Mikro parçalar farklı yöntemlerle üretilbilse de [13,14], mikro frezeleme yöntemiyle çok

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : elif.malyer@cbu.edu.tr

çeşitli malzemelerden karmaşık geometrilere ve dar toleranslara sahip parçalar üretmek mümkündür [15–19]. Son yıllarda mikro ölçekte işleme süreçlerinin optimizasyonu, özellikle yüzey bütünlüğü, mikroyapı kararlılığı ve çapak davranışının modellenmesi açısından araştırmacıların odağı haline gelmiştir.

Çapak oluşumu, özellikle yüksek tolerans gerektiren otomotiv ve havacılık endüstrilerinde istenmeyen bir durumdur [18–20]. Çapakların giderilmesi (deburring) ek operasyonlar gerektirir ve üretim maliyetini artırır [18]. Makro ölçekte frezelemeye kıyasla, mikro frezelemede çapakların uzaklaştırılması ve kontrolü, oluşan çapak boyutlarının çok küçük olması nedeniyle daha zordur [21,22]. Bu nedenle son yıllarda kriyojenik, MQL ve hibrit yağlama tekniklerinin mikro frezeleme uygulamalarına entegrasyonu, çapak oluşumunun azaltılması için umut verici çözümler olarak değerlendirilmektedir [29–31].

Literatürde mikro frezeleme sırasında çapak oluşumunu önlemeye yönelik çeşitli teknikler önerilmiştir. Jackson ve ark. [23] ile Cheng ve ark. [3], iş parçası yüzeyine plastik tabaka kaplamayı veya iş parçası bağlama çenelerinde değişiklik yapmayı olası çözümler arasında göstermiştir. Ti-6Al-4V alaşımının mikro frezeleme çalışmalarında ise çapak oluşumuna etki eden temel işlem değişkenleri ayrıntılı biçimde incelenmiştir. Rehman ve ark. [24], Ti-6Al-4V alaşımında yaptıkları çalışmada çapak oluşumunu en fazla etkileyen parametrenin kesme hızı olduğunu belirtmiştir. Bandaballi ve ark. [25], üç farklı takım kaplamasının (kaplamasız, TiAlN, AlTiN) etkisini incelemiş ve TiAlN kaplamalı takımların daha az takım aşınması ve çapak oluşumu sağladığını vurgulamıştır. Yadav ve ark. [4], kesme hızının çapak boyutuna etkisini incelemiş ve kesme hızının yaklaşık %2000 artırılmasının çapak boyutunu %95 oranında azalttığını raporlamıştır. Attanasio ve ark. [26], üç farklı mikroyapı ve üç farklı ısıtılma işlemi uygulanmış Ti-6Al-4V alaşımlarında çapak oluşumunu araştırmış ve çapak oluşumunun malzeme mikroyapısı ile doğrudan ilişkili olduğunu belirtmiştir. Özellikle 955 °C'de ısıtılıp 60 dakika fırında soğutulan numunelerde en düşük çapak oluşumu elde edilmiştir. Vipindas ve ark. [27], ilerleme miktarı ve kesme derinliğinin çapak oluşumuna önemli ölçüde etki ettiğini; ilerleme miktarının artırılmasının çapak boyutunu düşürdüğünü ifade etmiştir.

Son dönem çalışmaları, Ti-6Al-4V alaşımının mikro frezeleme sürecinde takım giriş stratejilerinin (helisel,

dalma, rampa tipi) ve soğutma koşullarının çapak yönü ve yüksekliği üzerinde belirleyici olduğunu göstermektedir [32–33]. Thepsonthi ve Özel [28], yüzey kalitesi ve çapak oluşumunun eşzamanlı optimizasyonunun kritik olduğunu vurgulamış; Bajpai ve ark. [29], yüksek hızlı işlemede takım giriş yönünün çapak morfolojisine etkisini ortaya koymuştur. Balázs ve ark. [30], mikro frezelemede ploughing etkisi, takım geometrisi ve mikroyapı arasındaki etkileşimi kapsamlı biçimde değerlendirmiştir. Wang ve ark. [31] ise mikro frezeleme sırasında kesme kuvvetine bağlı dinamik titreşimlerin çapak oluşumunu doğrudan etkilediğini raporlamıştır.

Ayrıca çevreci ve hibrit soğutma sistemlerinin (CryoMQL, nMQL-LN₂, Sc-CO₂-MQL) Ti-6Al-4V alaşımının işlenebilirliğini önemli ölçüde geliştirdiği bildirilmektedir. Kim ve ark. [34], hibrit nMQL-LN₂ sisteminin Ti-6Al-4V işlenebilirliğini sayısal olarak incelemiş ve 0° püskürtme açısında en yüksek soğutma veriminin elde edildiğini belirtmiştir. Khosravi ve ark. [35], Sc-CO₂ + MQL hibrit sisteminde takım aşınması ve çapak yüksekliğinde belirgin azalma gözlemlemiştir. Ahmed ve Ryon [36], CryoMQL tekniğinin kesme kuvvetlerini ve yüzey pürüzlülüğünü azaltarak yüzey topografisini iyileştirdiğini raporlamıştır. Wang ve ark. [37] ise kriyojenik mikro frezeleme koşullarında çapakların neredeyse tamamen ortadan kalktığını ve yüzey kalitesinin belirgin biçimde iyileştiğini bildirmiştir.

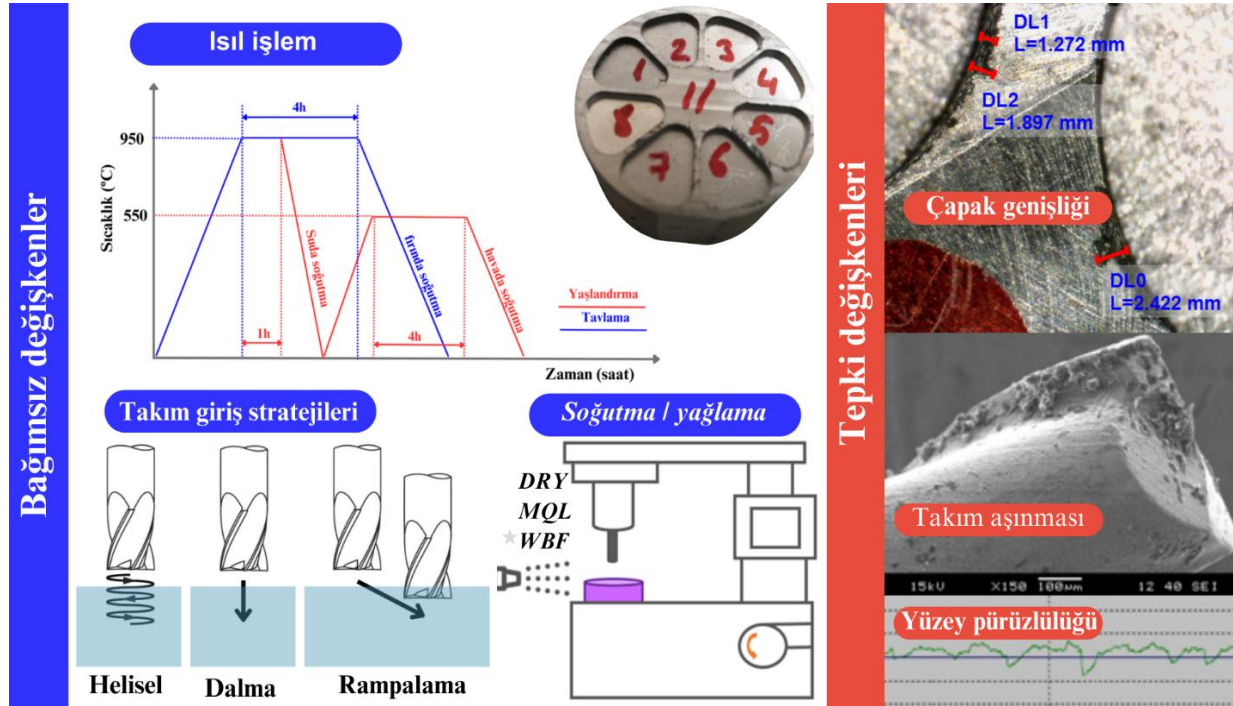
Bu bulgular, soğutma tipi ve takım giriş stratejisinin birlikte değerlendirilmesinin Ti-6Al-4V alaşımının mikro işlenebilirliğini ve yüzey bütünlüğünü optimize etmek açısından kritik öneme sahip olduğunu ortaya koymaktadır.

2. MATERYAL VE METOD (MATERIAL and METHOD)

Bu çalışmada, mikroyapı, takım giriş stratejisi ve soğutma/yağlama koşullarındaki değişimlerin, Ti-6Al-4V alaşımının mikro cep frezeleme işleminde oluşan çapak genişliği (μm) ve yüzey pürüzlülüğü (Ra, μm) üzerindeki etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Deneylerde kullanılan Ti-6Al-4V titanyum alaşımı 40 mm çapında silindirik çubuk olarak temin edilmiş ve mikro frezeleme için 40 mm boyunda numuneler hazırlanmıştır.

Çizelge 1. Ti-6Al-4V alaşımının elementel bileşimi ve temel mekanik özellikleri. (Elemental composition and basic mechanical properties of the Ti-6Al-4V alloy)

Kimyasal bileşim (%)							
Al	V	C	N	H	Fe	O	Ti
6.4	4.2	0.022	0.006	0.003	0.2	0.18	Denge (Bal.)
Mekanik özellikler							
Yoğunluk ρ (g/cm ³)	Çekme dayanımı σ _{UTS} (MPa)		Akma dayanımı σ _y (MPa)		Sertlik (HRC)		
4.43	982 ± 7		887 ± 8		33		

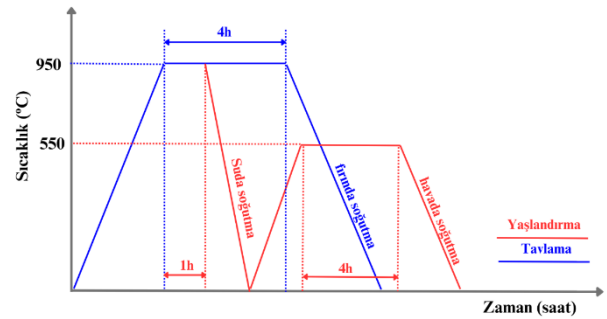


Şekil 1. Mikro cep frezeleme işleminde çapak oluşumunun deneysel sırası. (The experimental order of burr formation in micro-pocket milling.)

Deneysel işlem sırası Şekil 1’de sunulmuştur. Alaşımın kimyasal bileşimi ve temel mekanik özellikleri Tablo 1’de verilmiştir.

Ti-6Al-4V alaşımı, α fazı (CPH) ve β fazı (BCC) olmak üzere iki fazdan oluşmaktadır. Bu fazların hacimsel oranları, uygulanan ısıl işlemler ile kontrol edilebilmekte olup, bu durum kesme kuvvetlerini, takım aşınmasını ve yüzey kalitesini doğrudan etkilemektedir. Isıl işlem uygulamaları, Protherm PLF 120/7 (Türkiye) marka fırında gerçekleştirilmiş ve literatürde önerilen sıcaklık–zaman parametreleri esas alınmıştır [38]. Uygulanan ısıl işlem planı Şekil 2’de verilmiştir. Isıl işlemler sonrasında numuneler mikro frezeleme deneylerine hazır hale getirilmiştir. Mikro frezeleme deneyleri, 3 eksenli CNC dik işleme merkezinde gerçekleştirilmiştir. Deneylerde iki ağızlı, Ø0,6 mm çapında, AlTiCrN kaplamalı karbür

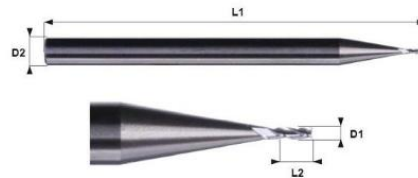
mikro parmak freze (Eurocut TP123, Almanya) kullanılmıştır.



Şekil 2. Ti-6Al-4V alaşımı için ısıl işlem planı (Heat treatment plan for Ti-6Al-4V alloy)

Çizelge 2. Kesici takım boyutları. (The tool dimensions.)

Tam boy (L1)	45 mm
Çap (D1)	0.6 mm
Sap çapı (D2)	4 mm
Kesme boyu (L2)	1.2 mm
Kesici ağız sayısı	2
Uç radüsü	0.005 mm
Helis açısı	30°



Kesici takım geometrik özellikleri Tablo 2’de, deneylerde kullanılan kesme parametreleri ise Tablo 3’te verilmiştir. Mikro cepler, Helisel (H), Rampalama (R) ve Dalma (D) olmak üzere üç farklı takım giriş stratejisi ile işlenmiştir. Takım yollarının oluşturulması için Siemens NX CAM yazılımı kullanılmıştır.

Çizelge 2. Mikro frezeleme deney parametreleri (Test parameters of micro-milling)

Parametre	Değer
Kesme hızı, Vc	280 m/dak
İlerleme, fz	0.036 mm/ağız
Talaş derinliği, ap	100 μ m
Yan kayma miktarı, ae	100 μ m
Takım çapı	0.6 mm
Ağız sayısı	2

Deneyler Kuru (DRY) ve Minimum miktarda yağlama (MQL) ve Bor esaslı akışkan (WBF) kullanıldığı şartlar olmak üzere üç farklı soğutma/yağlama koşulu altında yürütülmüştür. MQL uygulamalarında Falcon NM 151 marka cihaz kullanılmış; yağlama debisi 1,5 L/dak, hava basıncı 1 bar ve nozül açısı 45° olarak sabitlenmiştir. Bu parametreler, MQL’nin takım aşınmasını azaltmadaki etkin rolü dikkate alınarak seçilmiştir [39]. WBF, 100 ml saf suya 3 g bor esaslı toz ilave edilerek oluşturulan emülsiyon 1500 dev/dak hızda 45 dakika boyunca mekanik homojenizatörde karıştırılarak hazırlanmıştır.

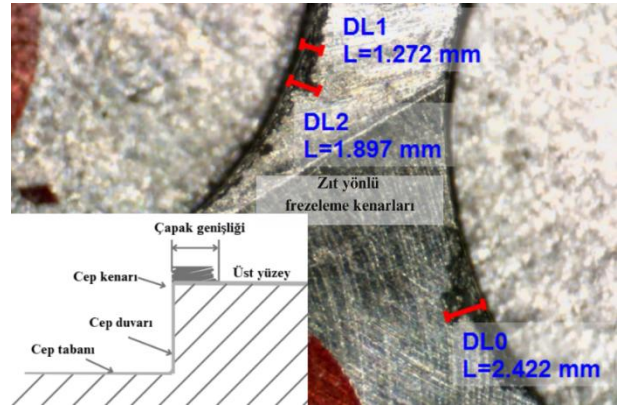
Mikro frezeleme deneyleri ısıtma işlemi türü, soğutma/yağlama koşulu ve takım giriş stratejisine bağlı olarak kodlanmıştır. Her bir deney koşulu üç parametreden oluşmaktadır:

- Takım giriş tipi: H (Helisel), R (Rampalama), P (Dalma)
- Soğutma/yağlama: DRY, MQL, WBF
- Isıtma işlemi: AH (Yaşlandırılmış), AN (Tavlama)

Bu kombinasyonlar ile toplam 18 farklı deney koşulu oluşturulmuştur. Örneğin, H-WBF-AH kodu “Helisel giriş + WBF + yaşlandırılmış numune” anlamına gelmektedir.

Takım aşınması analizleri COXEM EM-30 Plus SEM cihazı kullanılarak yapılmıştır. Yüzey pürüzlülüğü ölçümleri Time 3200 cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Çapak genişliği ölçümleri ise Dino-Lite dijital mikroskop ve Dino-Capture yazılımı ile her mikro cepden altı farklı noktadan alınmış ve aritmetik ortalama değerler kullanılmıştır (Şekil 3).

Her bir deney koşulunda iş parçası üzerinde 12 kesme düzlemi içeren 8 mikro cep işlenmiştir. Tek bir cebin işleme süresi yaklaşık 34 dakika, toplam işleme süresi ise 272 dakika (yaklaşık 4,5 saat) olarak ölçülmüştür.



Şekil 3. Çapak oluşumu ve ölçümü: a) Çapak oluşumu [28]’dan uyarlanmıştır, b) Çapak ölçümü (Burr formation and measurement: a) Burr formation adapted from [28], b) Burr measurement)

3. BULGULAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

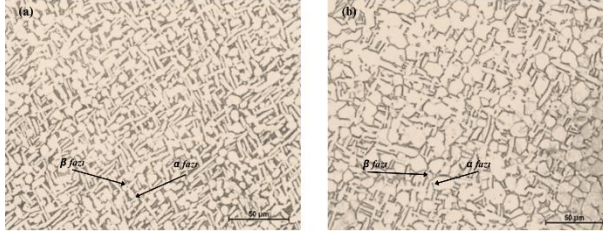
Bu çalışmada, her bir kesme koşulu için sekiz cep ve on iki kesme yüzeyi, Şekil 1’de gösterildiği gibi mikro frezeleme işlemine tabi tutulmuştur. Deneyler kuru, MQL ve WBF soğutma koşullarında gerçekleştirilmiştir. Her bir cep için işleme süresi yaklaşık 34 dakika, toplam işleme süresi ise 272 dakikadır. Birçok deneyde kesici takımlar uzun süreler boyunca kullanılabilmiş ve takım ömrünün tatmin edici düzeyde olduğu görülmüştür. Ancak, bazı WBF deneylerinde (H-WBF-AH, H-WBF-AN ve R-WBF-AN) takım kırılmaları meydana gelmiştir.

3.1. Isıtma İşlemin Mikroyapı ve Sertliğe Etkisi (Effect of Heat Treatment on Microstructure and Hardness)

Isıtma işlem uygulamaları sonrasında elde edilen mikroyapılar incelenerek, tavlama ve yaşlandırılmış numunelerdeki faz dağılımı, tane morfolojisi ve sertlik değişimleri değerlendirilmiştir. Ti-6Al-4V alaşımı, α fazı (kapalı paket hekzagonal – HCP) ve β fazı (gövde merkezli kübik – BCC) olmak üzere iki fazdan oluşan çift fazlı bir alaşımdır. Tavlama işlemi 955 °C’de 4 saat tutulma ve ardından fırında soğutma şeklinde uygulanırken; yaşlandırma işlemi 955 °C’de 1 saat ısıtma, su verme (su içinde ani soğutma) ve ardından 550 °C’de 1 saat hava ortamında bekletme aşamalarını içermiştir.

Isıtma işlem sonrasında elde edilen SEM mikroyapı görüntüleri (Şekil 4), tavlama numunelerinde α fazının yaklaşık %62.1, yaşlandırılmış numunelerde ise %75.4 oranında bulunduğunu göstermiştir. Buna karşılık, β fazı oranı sırasıyla %37.9 ve %24.6 olarak belirlenmiştir. Tavlama işleminde gerçekleşen yavaş soğutma, $\beta \rightarrow \alpha$ dönüşümünü artırarak β fazının oranını yaklaşık %13 azaltmıştır. Bu değişim sonucunda malzeme sertliği 436 HV’dan 459 HV’ye yükselmiştir. Literatürde de benzer şekilde, ısıtma işlem sıcaklığı ve bekletme süresinin α/β faz

morfolojisi ile sertlik gelişimi üzerinde belirleyici olduğu, yüksek sıcaklıklarda β fazının incelmesiyle sünekliliğin arttığı bildirilmektedir [40–41].



Şekil 4. Tavlanmış (a) ve yaşlandırılmış (b) Ti-6Al-4V numunelerin mikroyapı görüntüleri (Microstructures of annealed (a) and aged (b) Ti-6Al-4V samples)

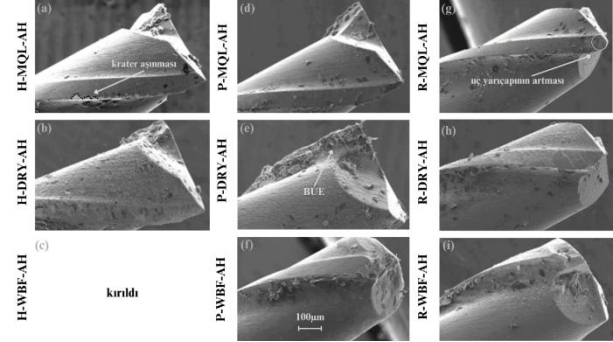
3.2 Takım Aşınması (Tool Wear)

Mikro frezeleme deneyleri sonrasında her bir kesme koşulu için takım aşınması ayrıntılı olarak incelenmiştir. Toplam 18 deneyden elde edilen SEM görüntüleri Şekil 5 ve Şekil 6'da sunulmaktadır. Ti-6Al-4V alaşımı, düşük ısı iletkenliği nedeniyle kesme bölgesinden ısının uzaklaştırılmasına izin vermez. Bu durum, kesme bölgesindeki sıcaklığın sürekli artmasına neden olarak malzemenin işlenebilirliğini olumsuz yönde etkiler. Ti-6Al-4V alaşımının işlenmesinde takım aşınması, yüzey pürüzlülüğü ve enerji tüketimi arasındaki doğrusal ilişki, literatürde tormalama işlemleri için de benzer şekilde rapor edilmiştir [42].

Deney sonuçları, MQL koşulunda takım aşınmasının en düşük seviyede gerçekleştiğini göstermiştir (Şekil 5a, 5d, 5g, 6a, 6d, 6g). Benzer şekilde, Gökçe ve Çiftçi [43], farklı metalik malzemelerin frezelenmesinde MQL benzeri kontrollü yağlama koşullarının takım aşınmasını azalttığını ve takım ömrünü olumlu yönde etkilediğini rapor etmiştir. Buna karşılık, WBF koşullarında takım aşınmasının belirgin şekilde arttığı gözlenmiştir (Şekil 5f, 5i, 6f). Literatürde de benzer şekilde, aşırı soğutma yöntemlerinde (örneğin kriyojenik soğutma) yüksek soğuma hızları nedeniyle takım aşınmasının artış gösterdiği belirtilmiştir [44]. Bununla birlikte, WBF ortamında kuru kesmeye kıyasla talaş yapışmasının (adhesion wear) daha az olduğu tespit edilmiştir.

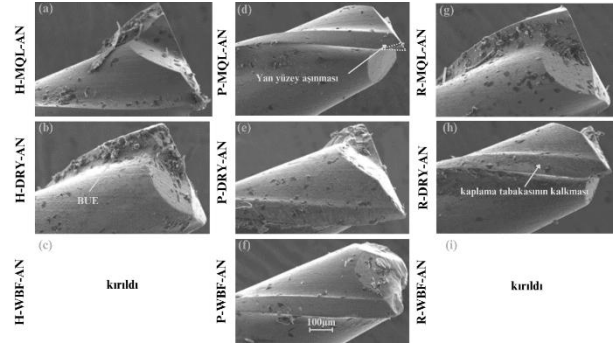
Mikro cep frezeleme işlemlerinde helisel, rampalama (ramp-on-part) ve dalma (plunge) gibi farklı takım giriş stratejileri yaygın olarak kullanılmaktadır. Her bir giriş tipi, kesme kuvvetlerinin yönü ve büyüklüğüne bağlı olarak takım davranışını farklı şekilde etkilemektedir [45]. Bu çalışmada da takım aşınmasının WBF koşullarında takım giriş tipine doğrudan bağlı olarak değiştiği belirlenmiştir (Şekil 5f, 5l, 6f). Özellikle helisel ve rampalı girişlerde radyal yüklerin artmasına bağlı olarak takım kırılmaları gözlenmiştir. Bu durumun, mikro kesicilerin yüksek çap/uzunluk oranına bağlı olarak oluşan eksenel gerilmelerden kaynaklandığı düşünülmektedir. Bu nedenle radyal yükleri azaltmak amacıyla dalma tipi (plunge) takım girişinin tercih edilmesi önerilebilir. Ayrıca, helis ve rampa açıları uygun seçildiğinde bu problem kısmen giderilebilir.

Isıl işlem sonrası artan sertlik, difüzyon aşınmasını hızlandırarak kesici uçta yığılma talaşı (Built-Up Edge, BUE) oluşumunu teşvik etmiştir [46].

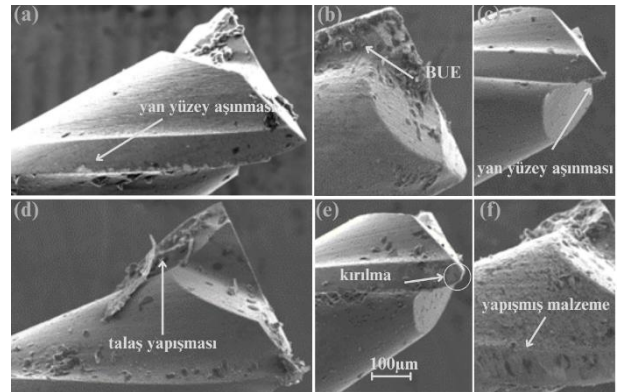


Şekil 5. Yaşlandırılmış numunelere ait takım aşınması görüntüleri (Tool wear images of aged samples)

Takım aşınma tiplerinin daha iyi analiz edilebilmesi amacıyla kırılma gözlenmeyen 15 deneyden elde edilen belirgin aşınma türleri Şekil 7'de sunulmuştur. İncelemeler, kesici uçlarda birden fazla aşınma türünün aynı anda geliştiğini göstermektedir. Şekil 7a (H-MQL-AH) numunesinde kesici kenarda belirgin yan yüzey aşınması (flank wear) gözlenmiştir. Bu aşınma genellikle kesici kenar boyunca homojen dağılmıştır. Ayrıca kesme esnasında oluşan mekanik yükler nedeniyle kısmi mikro parçalanmalar (micro-chipping) meydana gelmiştir.



Şekil 6. Tavlanmış numunelere ait takım aşınması görüntüleri (Tool wear images of annealed samples)



Şekil 7. Ti-6Al-4V alaşımının mikro cep frezeleme işleminde takım aşınma mekanizması (Tool wear mechanism in micro-pocket milling of Ti-6Al-4V alloy)

Yığılma talaşı (BUE) birçok deneyde tespit edilmiş olup Şekil 7b (H-DRY-AN) numunesinde açık biçimde görülmektedir. Ti-6Al-4V alaşımı kimyasal olarak oldukça inert bir malzeme olmasına rağmen, kesici takım kaplaması (AlTiCrN) ile kısmi kimyasal etkileşime girerek difüzyon aşınması sonucu krater aşınmalarına (crater wear) yol açmıştır [46]. Düşük ısı iletkenlik nedeniyle kesici takım, kesme bölgesinde oluşan ısıdan doğrudan etkilenmekte ve bu da difüzyon aşınmasını hızlandırmaktadır. Ayrıca, Şekil 7c (P-MQL-AN) ve Şekil 7e (R-MQL-AH) numunelerinde burun yarıçapının arttığı ve kesici uçta kırılmaların meydana geldiği belirlenmiştir.

3.3 Yüzey Pürüzlülüğü (Surface Roughness)

Yüzey pürüzlülüğü, işlenmiş parçaların yüzey bütünlüğünü belirleyen en önemli parametrelerden biridir. Ti-6Al-4V alaşımının işlenmesinde ilerleme oranının, yüzey pürüzlülüğü, titreşim ve enerji tüketimi üzerinde baskın etkiye sahip olduğu, tornalama işlemleri için de literatürde benzer şekilde rapor edilmiştir [46]. Bu nedenle tüm deneylerde yüzey pürüzlülüğü ölçümleri düzenli olarak gerçekleştirilmiştir. Ölçülen yüzey pürüzlülük değerleri Tablo 4'te verilmiştir. Tablo 4 incelendiğinde, yüzey pürüzlülüğü değerlerinin 0.352–0.757 μm aralığında değiştiği, en düşük Ra değerlerinin genel olarak kuru kesme ve MQL koşullarında elde edildiği görülmektedir. Şekil 8'de soğutma/yağlama

koşullarının, takım giriş tiplerinin ve ısı işlemlerin yüzey kalitesi üzerindeki etkileri gösterilmektedir.

Tablo 4. Soğutma koşulu, takım giriş stratejisi ve ısı işlem türüne bağlı ortalama yüzey pürüzlülüğü (Ra) ve çapak genişliği değerleri. (Average surface roughness (Ra) and burr width values depending on cooling condition, tool entry strategy, and heat treatment type.)

Elde edilen sonuçlara göre, yaşılandırılmış numunelerde daha iyi yüzey kalitesi elde edilmiştir. İlginç biçimde, Ankem ve ark. [48] çalışmalarında tavllanmış numunelerde daha yüksek yüzey kalitesi raporlamış; bunu mikroyapıda β -faz oranının artmasıyla açıklamışlardır. Ancak bu çalışmada, yaşılandırılmış numunelerde yüzey kalitesinde yaklaşık %28 oranında iyileşme tespit edilmiştir.

Yüzey pürüzlülüğü iyileşme oranı kuru kesme koşullarında %31, WBF koşullarında ise %51 olarak belirlenmiştir. MQL yöntemiyle yapılan deneylerde ise, her iki ısı işlem koşulunda da yüzey pürüzlülüğünde anlamlı bir fark gözlenmemiştir; bu durum, MQL'nin yağlama etkisinin baskın olmasından kaynaklanmaktadır. Tüm koşullarda MQL yöntemi, en düşük yüzey pürüzlülüğü değerini sağlamıştır.

Artan takım aşınmasının yüzey kalitesini olumsuz etkilediği bilinmektedir. Benzer şekilde, yığıntı kenar (BUE) oluşumunun takım aşınmasını artırarak yüzey pürüzlülüğünü olumsuz etkilediği Politeknik Dergisi'nde rapor edilmiştir [49]. Bununla birlikte, MQL yöntemi

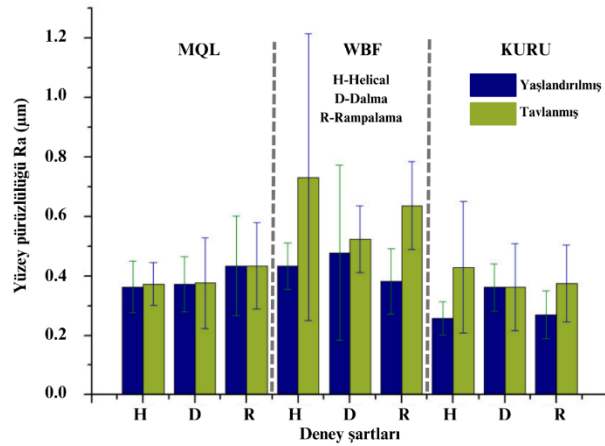
Çizelge 4. Soğutma koşulu, takım giriş stratejisi ve ısı işlem türüne bağlı ortalama yüzey pürüzlülüğü (Ra) ve çapak genişliği değerleri (Average surface roughness (Ra) and burr width values depending on cooling condition, tool entry strategy, and heat treatment type)

Deney Kodu	Takım Girişi	Soğutma	Isıl İşlem	Ra_ort (μm)	Çapak Genişliği (μm)
H-DRY-AH	Helisel	Kuru	Yaşılandırılmış	0,352	3615
H-MQL-AH	Helisel	MQL	Yaşılandırılmış	0,363	620
H-WBF-AH	Helisel	WBF	Yaşılandırılmış	0,434	0
R-DRY-AH	Rampalama	Kuru	Yaşılandırılmış	0,375	2468,3
R-MQL-AH	Rampalama	MQL	Yaşılandırılmış	0,434	682,3
R-WBF-AH	Rampalama	WBF	Yaşılandırılmış	0,463	0
P-DRY-AH	Dalma	Kuru	Yaşılandırılmış	0,362	1427
P-MQL-AH	Dalma	MQL	Yaşılandırılmış	0,515	1150
P-WBF-AH	Dalma	WBF	Yaşılandırılmış	0,618	1583,6
H-DRY-AN	Helisel	Kuru	Tavllanmış	0,454	2438
H-MQL-AN	Helisel	MQL	Tavllanmış	0,456	518,3
H-WBF-AN	Helisel	WBF	Tavllanmış	0,757	0
R-DRY-AN	Rampalama	Kuru	Tavllanmış	0,439	1814
R-MQL-AN	Rampalama	MQL	Tavllanmış	0,434	394,3
R-WBF-AN	Rampalama	WBF	Tavllanmış	0,637	0
P-DRY-AN	Dalma	Kuru	Tavllanmış	0,362	2264
P-MQL-AN	Dalma	MQL	Tavllanmış	0,474	772
P-WBF-AN	Dalma	WBF	Tavllanmış	0,523	0

takım-parça temasını iyileştirerek hem yüzey kalitesini hem de takım ömrünü artırmaktadır [39]. Tüm deney kesme anını yumuşatarak kesme yükünü azaltmasıdır. Ancak, WBF koşullarında etkili soğutma nedeniyle sıcaklığın düşmesi, helisel ve rampalı girişlerde takım kırılmalarına yol açmıştır.

3.4 Çapak Oluşumu (Burr Formation)

Çapak, hassas işlenmiş parçalar için en istenmeyen yüzey kusurlarından biridir. Mikro frezeleme işlemlerinde çapak boyutunun ölçümünde çeşitli yöntemler kullanılmakla birlikte, cep frezeleme işlemleri için en yaygın yöntem, çapak genişliği ve yüksekliğinin ölçülmesidir [1]. Farklı kesme mekanizmaları, farklı çapak şekilleri ve boyutlarının oluşmasına neden olur. Çapak genişliği, kesme parametrelerine bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Bu nedenle her koşul için en az altı farklı noktadan ölçüm yapılmış, ortalama değerler Şekil 9'da sunulmuştur. Belirtilen deney koşulları için elde edilen ortalama çapak genişliği değerleri de sayısal olarak Tablo 4'te verilmiştir. Tablo 4 incelendiğinde, WBF koşulunda helisel ve rampalama giriş stratejileri için tüm ısıtıl işlem durumlarında çapak oluşumunun tamamen ortadan kalktığı, dalma giriş stratejisinde ise yalnızca yaşlandırılmış numunede WBF koşulunda 1583.6 µm çapak oluştuğu görülmektedir.



Şekil 8. Yüzey pürüzlülüğü (Ra) ölçüm sonuçları (Surface roughness (Ra) measurements)

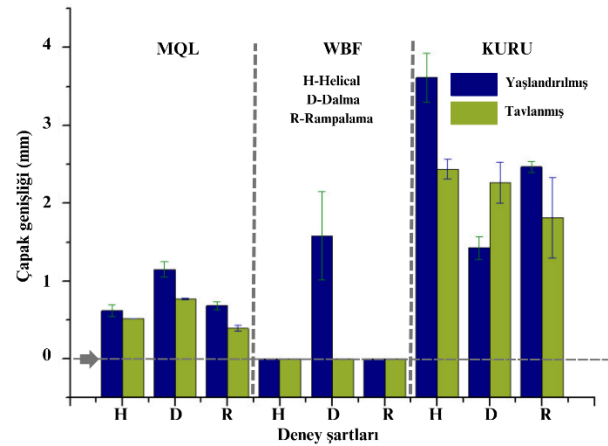
Şekil 9 incelendiğinde, yaşlandırılmış numunelerde daha büyük çapaklar oluştuğu görülmektedir. Literatürde Ti-6Al-4V alaşımının delinmesi sırasında, iş parçası sertliğinin artmasının çapak oluşumunu artırdığı bildirilmiştir [48]. Ayrıca, sertlik artışı ile artan plastik deformasyon direnci ve kesme kuvvetleri, mikro işleme süreçlerinde de benzer biçimde çapak riskini yükseltebilir. Bu görüş, güncel literatürde malzeme sertliği – işlenebilirlik ilişkisini irdileyen kapsamlı derlemelerle de desteklenmektedir [50]. Frezeleme işlemlerinde, diş başına ilerleme, kesici uç geometrisi ve kesme parametrelerinin çapak oluşumu üzerinde belirleyici olduğu literatürde rapor edilmiştir [51].

koşullarında helisel takım girişi, en yüksek yüzey kalitesini sağlamıştır. Bunun nedeni, helisel girişin ilk

MQL koşullarında yapılan deneylerde, en fazla çapak oluşumu dalma tipi (plunge) girişlerde gözlenmiştir. Bunun nedeni, kesme kuvvetlerinin doğrudan kesici uca etki etmesidir. Hem MQL hem de WBF koşullarında çapak miktarı, kuru koşullara kıyasla daha düşüktür; çünkü bu yöntemler yeterli soğutma ve yağlama sağlamaktadır. Ancak WBF'nin bir yağlayıcı olarak yetersiz kaldığı da belirlenmiştir.

Frezeleme işlemlerinde, takım uç yarıçapı, diş başına ilerleme ve talaş kalınlığı arasında doğrudan bir ilişki bulunmaktadır. Talaş kalınlığı, işleme süreci boyunca maksimum değerden sıfıra düşmektedir. Talaş kalınlığı kritik talaş kalınlığının altına indiğinde, talaş yığılması meydana gelir ve iş parçası kenarlarında istenmeyen keskin çıkıntılar (çapaklar) oluşur [50]. Benzer şekilde, diş açma işlemlerinde talaş oluşumu ve kesme kuvvetleri arasındaki etkileşimin çapak ve yüzey bütünlüğü üzerinde belirleyici olduğu, sonlu elemanlar yöntemi ile yapılan çalışmalarda da gösterilmiştir [52].

WBF koşullarında yapılan deneylerde, çapak oluşumu sınırlı kalmış, ancak en fazla takım kırılması da bu koşullarda gözlenmiştir. Biermann ve Hartmann [53], kriyojenik CO₂ soğutmanın 34CrNiMo6 ve AlMgSi malzemelerinde malzemeyi gevreklettiğini bildirmiştir. Bu çalışmada da benzer biçimde, talaş kalınlığı kritik değer altına düştüğünde talaşın cep kenarında birikmesi yerine takımın kırıldığı sonucuna varılmıştır.



Şekil 9. Ortalama çapak boyutları (The average of the burr sizes)

4. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada, Ti-6Al-4V alaşımının mikro cep frezeleme işlemi ayrıntılı olarak incelenmiştir. Bu kapsamda, malzemenin mikroyapısı; takım aşınması, çapak genişliği, yüzey kalitesi, farklı soğutma/yağlama koşulları ve takım giriş stratejileri açısından değerlendirilmiştir. Deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen temel bulgular aşağıda özetlenmiştir:

• En küçük çapak genişliği ve en yüksek yüzey kalitesi, uygun işleme parametrelerinin seçilmesiyle elde edilmiştir. Genel olarak helisel takım girişi en yüksek yüzey kalitesini sağlarken, rampalama giriş en düşük yüzey kalitesine neden olmuştur.

• Numunelere uygulanan ısıtma işlemleri (tavlama ve yaşlandırma) sonucunda, yaşlandırılmış numunelerde α -faz oranı yaklaşık %75.41, tavlama numunelerinde ise %62.09 olarak belirlenmiştir. Mikroyapıdaki α -faz oranının artmasıyla, malzeme sertliği yaklaşık 23.3 HV yükselmiştir.

• Ti-6Al-4V iş parçalarının faz yapısı, mikro cep frezeleme performansını doğrudan etkilemiştir. β -faz oranının azalmasıyla, yığılma talaşı (BUE) oluşumunun boyutu ve şekli önemli ölçüde değişmiştir.

• Tüm soğutma/yağlama koşullarında farklı aşınma türleri (krater aşınması, yan yüzey aşınması ve yığılma talaşı) gözlemlenmiştir. Bu koşullar arasında en iyi performans MQL yöntemiyle elde edilmiştir. Buna karşılık, WBF koşulunda en yüksek takım aşınması meydana gelmiş ve bunun soğutma etkisinin baskın olmasından kaynaklandığı belirlenmiştir.

DeneySEL bulgular, beklendiği üzere, WBF'nin yağlayıcı özellik açısından yetersiz kaldığını göstermiştir. Bu nedenle, WBF'ye yağlayıcı katkıları eklenerek mikro işleme uygulamalarında çapak oluşumunu en aza indiren yeni bir kesme sıvısı geliştirilmesi önerilmektedir. Ayrıca, WBF kullanımı sırasında kesme sıcaklığının ölçülmesi, ileride yapılacak çalışmalarda daha kapsamlı verilerin elde edilmesini sağlayacaktır.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

2018-121 numaralı projeye vermiş oldukları destekten dolayı Celal Bayar Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi'ne teşekkür ederiz.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazarı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

Elif MALYER: Çalışmanın kavramsallaştırılması, deneylerin tasarlanması ve gerçekleştirilmesi, verilerin analizi ve makalenin yazımı.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

[1] Bajpai V., Kushwaha A. K. and Singh R. K., "Burr formation and surface quality in high speed micromilling of titanium alloy (Ti-6Al-4V)", *International*

Manufacturing Science and Engineering Conference Proceedings, V002T03A017, (2013).

- [2] Kumar P., Bajpai V. and Singh R., "Burr height prediction of Ti-6Al-4V in high speed micro-milling by mathematical modeling", *Manufacturing Letters*, 11: 12-16, (2017).
- [3] Cheng J., Jin Y., Wu J., Wen X., Gong Y., Shi J. and Cai G., "Experimental study on a novel minimization method of top burr formation in micro-end milling of Ti-6Al-4V", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 86: 2197-2217, (2016).
- [4] Yadav A. K., Bajpai V., Singh N. K. and Singh R. K., "FE modeling of burr size in high-speed micro-milling of Ti-6Al-4V", *Precision Engineering*, 49: 287-292, (2017).
- [5] Özel T., Olleak A. and Thepsonthi T., "Micro milling of titanium alloy Ti-6Al-4V: 3-D finite element modeling for prediction of chip flow and burr formation", *Production Engineering*, 11: 435-444, (2017).
- [6] Gilbert R., "Heat treating of titanium and titanium alloys", *ASM Handbook*, (1991).
- [7] Ezugwu E. O. and Wang Z. M., "Titanium alloys and their machinability—a review", *Journal of Materials Processing Technology*, 68 (3): 262-274, (1997).
- [8] Ensarioğlu C. and Çakır M. C., "Titanyum ve alaşımlarının işlenebilirlik etüdü – Bölüm I", *Mühendis ve Makina*, 46 (546): 36-46, (2005).
- [9] Kumar M. and Bajpai V., "Experimental investigation of top burr formation in high-speed micro-milling of Ti-6Al-4V alloy", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 234 (4): 730-738, (2020).
- [10] Niu Z., Jiao F. and Cheng K., "An innovative investigation on chip formation mechanisms in micro-milling using natural diamond and tungsten carbide tools", *Journal of Manufacturing Processes*, 31: 382-394, (2018).
- [11] Yi J., Wang X., Jiao L., Li M., Xiang J., Yan P. and Chen S., "Micro-flank milling forces considering stiffness of thin-walled parts", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 95: 2767-2782, (2018).
- [12] Sun Q., Cheng X., Liu Y., Yang X. and Li Y., "Modeling and simulation for micromilling mechanisms", *Procedia Engineering*, 174: 760-766, (2017).
- [13] Kuram E. and Özçelik B., "Multi-objective optimization using Taguchi-based grey relational analysis for micro-milling of Al 7075 material with ball nose end mill", *Measurement*, 46 (6): 1849-1864, (2013).
- [14] Afazov S. M., Zdebski D., Ratchev S. M., Segal J. and Liu S., "Effects of micro-milling conditions on the cutting forces and process stability", *Journal of Materials Processing Technology*, 213 (5): 671-684, (2013).
- [15] Dib M. H. M., Duduch J. G. and Jasinevicius R. G., "Minimum chip thickness determination by means of cutting force signal in micro end-milling", *Precision Engineering*, 51: 244-262, (2018).
- [16] Rezaei H., Sadeghi M. H. and Budak E., "Determination of minimum uncut chip thickness under various machining conditions during micro-milling of Ti-6Al-4V", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 95: 1617-1634, (2018).
- [17] Miranda M., Serje D., Pacheco J. and Bris J., "Tool edge radius wear and material removal rate performance charts

- for titanium micro-milling”, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 19: 79-84, (2018).
- [18] Bayraktar Ş. and Turgut Y., “Al-5083 alaşımının frezelenmesinde kesme kuvveti, yüzey pürüzlülüğü ve çapak yüksekliğinin optimizasyonu”, 7th International Symposium on Machining, 3-5, (2016).
- [19] Niknam S. A. and Songmene V., “Analysis of friction and burr formation in slot milling”, *Procedia CIRP*, 17: 755-759, (2014).
- [20] Niknam S. A. and Songmene V., “Milling burr formation, modeling and control: a review”, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 229 (6): 893-909, (2015).
- [21] Kumar P., Kumar M., Bajpai V. and Singh N. K., “Recent advances in characterization, modeling and control of burr formation in micro-milling”, *Manufacturing Letters*, 13: 1-5, (2017).
- [22] Oliaci S. N. B. and Karpat Y., “Built-up edge effects on process outputs of titanium alloy micro-milling”, *Precision Engineering*, 49: 305-315, (2017).
- [23] Jackson M. J., Robinson G. M., Whitfield M. D. and Ahmed W., “Burr formation and elimination in micromilling processes”, *International Journal of Nanomanufacturing*, 1 (4): 458-467, (2007).
- [24] Rehman G. U., Jaffery S. H. I., Khan M., Ali L., Khan A. and Ikramullah Butt S., “Analysis of burr formation in low-speed micro-milling of titanium alloy (Ti-6Al-4V)”, *Mechanical Sciences*, 9 (2): 231-243, (2018).
- [25] Bandapalli C., Singh K. K., Sutaria B. M. and Bhatt D. V., “Experimental investigation of top burr formation in high-speed micro-end milling of titanium alloy”, *Machining Science and Technology*, 22 (6): 989-1011, (2018).
- [26] Attanasio A., Gelfi M., Pola A., Ceretti E. and Giardini C., “Influence of material microstructures in micromilling of Ti-6Al-4V alloy”, *Materials*, 6 (9): 4268-4283, (2013).
- [27] Vipindas K., Kuriachen B. and Mathew J., “Investigations into the effect of process parameters on surface roughness and burr formation during micro end milling of Ti-6Al-4V”, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 100: 1207-1222, (2019).
- [28] Thepsonthi T. and Özel T., “Multi-objective process optimization for micro-end milling of titanium alloy (Ti-6Al-4V): an application of Taguchi-based grey relational analysis”, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 63: 903–912, (2012).
- [29] Bajpai V., Kushwaha A. K. and Singh R. K., “Characterization of burr formation during high-speed micromilling of Ti-6Al-4V alloy”, ASME 2013 International Manufacturing Science and Engineering Conference, V002T03A017, (2013).
- [30] Balázs B., Karoliny T., Radványi L. and Karpuschewski B., “Recent advances in micro milling: tool wear, minimum chip thickness and process stability”, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 114: 2743–2765, (2021).
- [31] Wang Y., Liu Y., Zhao W., Sun H. and Zhang Y., “Dynamic response and vibration characteristics in micro-milling of titanium alloy Ti-6Al-4V”, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 187: 109953, (2023).
- [32] Pratap T., Sahoo P. and Mishra D., “Influence of tool geometry and cutting parameters on burr formation in micro-milling of titanium alloy”, *Precision Engineering*, 78: 261–273, (2022).
- [33] Aramcharoen A. and Mativenga P. T., “Size effect and tool geometry in micro milling of titanium alloy Ti-6Al-4V”, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 41: 884–893, (2009).
- [34] Kim W. Y., Senguttuvan S., Kim S. H., Lee S. W. and Kim S. M., “Numerical study of flow and thermal characteristics in titanium alloy milling with hybrid nanofluid MQL and cryogenic nitrogen cooling”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 170: 121005, (2021).
- [35] Khosravi J., Azarhoushang B., Barmouz M., Böisinger R. and Zahedi A., “High-speed milling of Ti-6Al-4V under a supercritical CO₂ + MQL hybrid cooling system”, *Journal of Manufacturing Processes*, 82: 1–14, (2022).
- [36] Ahmed Y. S. and Ryon A., “Tribological performance of a hybrid CryoMQL system on Ti-6Al-4V milling”, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 120: 8185–8199, (2022).
- [37] Wang F., Pang Q. and Yang Q., “Effect of cryogenic cooling on micro-milling properties of titanium alloy”, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 34: 6472–6483, (2025).
- [38] Akyol S., “Ti-6Al-4V titanyum alaşımının işlenebilirliğinin ısıtma işlemiyle artırılması”, Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, (2007).
- [39] Vazquez E., Gomar J., Ciurana J. and Rodríguez C. A., “Analyzing effects of cooling and lubrication conditions in micromilling of Ti-6Al-4V”, *Journal of Cleaner Production*, 87: 906–913, (2015).
- [40] Noghani, M. T., Bayat, O., Moghadam, O., & Mehrizi, V. A., “Effect of various microstructures obtained from heat treatment on machinability behavior of Ti-6Al-4V alloy”, *International Journal of Engineering, Transactions A: Basics*, 35, 184–190, (2022).
- [41] Ahmadi, M., Karpat, Y., Acar, O., & Kalay, Y. E., “Microstructure effects on process outputs in micro-scale milling of heat-treated Ti-6Al-4V titanium alloys”, *Journal of Materials Processing Technology*, 252, 333–347, (2018).
- [42] Akkus H. and Yaka H., “Optimization of cutting parameters in turning of titanium alloy (grade 5) by analysing surface roughness, tool wear and energy consumption”, *Experimental Techniques*, 46 (2): 945–956, (2021).
- [43] Gökçe H. and Çiftçi İ., “Molibden ve alaşımlarının frezelenmesinde takım aşınmasının incelenmesi”, *Politeknik Dergisi*, 27(3): 839–847, (2024).
- [44] Chaabani S., Arrazola P. J., Ayed Y., Madariaga A., Tidu A. and Germain G., “Comparison between cryogenic coolants effect on tool wear and surface integrity in finishing turning of Inconel 718”, *Journal of Materials Processing Technology*, 285: 116780, (2020).
- [45] Ramli A. S., Sharif S., Said A. Y. M., Yusop M. S. M., Karim Z. and Mohruni A. S., “Investigation of tool entry strategy when pocket milling titanium alloy Ti-6Al-4V under wet condition”, AIP Conference Proceedings, 2129(1): 070004, (2019).
- [46] Akagündüz E., “Investigation of microstructures and surface scratch strength of heat treated Ti6Al4V alloys”, M.S. thesis, Department of Materials Science and

- Engineering, Gebze Technical University, Kocaeli, (2008).
- [47] Akkus H. and Yaka H., “Experimental and statistical investigation of the effect of cutting parameters on surface roughness, vibration and energy consumption in machining of titanium 6Al-4V ELI (grade 5) alloy”, *Measurement*, 167: 108465, (2021)
- [48] Ankem S., Margolin H., Greene C. A., Neuberger B. W. and Oberson G., “Mechanical properties of alloys consisting of two ductile phases”, *Progress in Materials Science*, 51(5): 632–709, (2006).
- [49] Patil R., Shinde S., Marla D., Joshi S., “Experimental analysis of burr formation in drilling of Ti-6Al-4V alloy”, *International Journal of Mechatronics and Manufacturing Systems*, 9(3): 237–245, (2016).
- [50] Pimenov D. Yu., Mia M., Gupta M. K., Machado A. R., Tomaz I. V., Sarikaya M., Wojciechowski S., Mikolajczyk T. and Kapłonek W., “Improvement of machinability of Ti and its alloys using cooling-lubrication techniques: a review and future prospect”, *Journal of Materials Research and Technology*, 11: 719–753, (2021).
- [51] Aslantas K., Ekici E. and Cicek A., “Optimization of process parameters for micro milling of Ti-6Al-4V alloy using Taguchi-based grey relational analysis”, *Measurement*, 128: 419–427, (2018).
- [52] Yaman K. and Tekiner Z., “Investigation of the Effect of Built-Up Edge on Chip Morphology at the Cutting Edge During Turning Operation”, *Politeknik Dergisi*, 27(6): 2325–2333, (2024).
- [53] Demirel T., Yağmur S., Kayır Y. and Kurt A., “Investigation of thrust force, torque and chip formation in tapping threading by finite element method”, *Politeknik Dergisi*, 27(4): 1633–1641, (2024).
- [54] Karan J., Hiren S. and Satish D., “Burr formation mechanism in machining – a review”, Proceedings of the National Conference on Progress, Research and Innovation in Mechanical Engineering (PRIME), 167, (2017).