

Tel Erozyon Yöntemiyle İşlenmiş Ti 6Al 4V Alaşımının Yüzey Kalitesinin Manyetik Aşındırıcılarla İşleme Yöntemiyle İyileştirilmesi

Mahmut ÇELİK^{1*}, Hakan GÜRÜN², Ulaş ÇAYDAŞ³

¹Uçak Gönde ve Motor Bakımı Bölümü, Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Erciyes Üniversitesi, Kayseri, Türkiye

²İmalat Mühendisliği Bölümü, Teknoloji Fakültesi, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye

³Makine Mühendisliği Bölümü, Teknoloji Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye

*¹ mahmutcelik@erciyes.edu.tr, ² hgurun@gazi.edu.tr, ³ ucaydas@firat.edu.tr

(Geliş/Received: 30/01/2021;

Kabul/Accepted: 13/02/2021)

Öz: Tel erozyonla işleme (TEİ) yöntemi işlenmesi zor malzemeler grubunda yer alan Ti 6Al 4V alaşımının işlenmesinde kullanılan geleneksel olmayan bir imalat yöntemidir. Yöntemde işlenen malzeme yüzeyinde, çatlaklar, yeniden katılmış artı tabakalar ve kraterler gibi malzemenin mekanik özelliklerini etkileyen istenmeyen oluşumlar meydana gelmektedir. Bu oluşumların ortadan kaldırılarak hem mekanik özelliklerinin hem de yüzey kalitesinin iyileştirilmesi için ikinci bir bitirme işlemine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu çalışmada tel erozyon yöntemiyle sabit işleme koşullarında işlenmiş olan Ti 6Al 4V alaşımından imal edilmiş olan numunelerin yüzey kaliteleri manyetik aşındırıcılarla işleme yöntemiyle artırılmıştır. Çalışmada, işleme süresi, aşındırıcı boyutu, devir sayısı ve manyetik alan miktarı parametrelerinin işlem performansı üzerindeki etkileri Taguchi L9 ortogonal dizin deneysel tasarımıyla incelenmiştir. Manyetik aşındırıcılarla işleme işlemi sonrası yüzey pürüzlülüğündeki iyileşme oranları (YPİÖ) ve talaş kaldırma oranları (TKO) belirlenmiştir. Numunelere ait taramalı elektron mikroskopu (SEM) görüntüleri alınmış ve yüzey özellikleri ve artı tabaka yapıları incelenmiştir. Çalışma sonucunda TKO değerlerinin işleme süresinin artmasıyla azalırken, aşındırıcı boyutu, devir sayısı ve manyetik alan miktarının artmasıyla arttığı, YPİÖ değerlerinin ise ortalama %92 olarak ölçüldüğü ve uygun işleme koşullarıyla bu sonucun %96 oranlarına kadar arttığı tespit edilmiştir. Artı tabaka miktarının ise yapılan bütün deneylerde tamamen ortadan kaldırıldığı tespit edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Manyetik aşındırıcılarla işleme, Tel erozyonla işleme, Yüzey kalitesi, Artı tabaka, Ti-6Al-4V

Improvement of Surface Quality of W-EDMed Ti 6Al 4V Alloy by Magnetic Abrasive Finishing

Abstract: Wire electro discharge machining method is an unconventional manufacturing method used in the machining of Ti 6Al 4V alloy, which is in the group of materials that are difficult to machine. Undesirable formations such as cracks, recast layers and craters that affect the mechanical properties of the material occur on the surface of the material machined in the method. A second finishing process is required to eliminate these formations and improve both the mechanical properties and the surface quality. In this study, the surface qualities of the specimens made of Ti 6Al 4V alloy machined with wire electro discharge method under constant machining conditions were increased by magnetic abrasive finishing method. In the study, the effects of machining time, abrasive size, number of cycles and magnetic field parameters on process performance were investigated with the experimental design of Taguchi L9 orthogonal array. After machining with magnetic abrasives, surface roughness improvement rates (SRIR) and material removal rates (MRR) were determined. Scanning electron microscopy (SEM) images of the specimens were taken and surface properties and recast layer structures were examined. As a result of the study, it was determined that the MRR values decreased with the increase of the processing time; increase with the increase of abrasive size, the rotation number and the magnetic field, SRIR values were measured as 92% on average and this result increased up to 96% with appropriate processing conditions. It has been determined that the amount of residual layer has been completely removed in all experiments.

Key words: Magnetic abrasive finishing, Wire electro discharge machining, Surface quality, Recast layer, Ti-6Al-4V.

1. Giriş

Mühendislik uygulamalarında kullanılan bir ürüne ham maddeden nihai ürün oluşumuna kadar geçen süreçte genellikle, döküm, plastik şekil verme, talaşlı imalat ve gerekli olması halinde ısıtım işlem basamakları uygulanmaktadır. Bu süreçler sonrasında oluşan ürünlerde farklı seviyelerde yüzey pürüzlülüğü ve kılcal çatlaklar,

* Sorumlu yazar: mahmutcelik@erciyes.edu.tr. Yazarların ORCID Numarası: ¹ 0000-0003-4272-1319, ² 0000-0001-6189-6830, ³ 0000-0001-6706-1332

ısıdan etkilenen bölgeler ve çizikler gibi istenmeyen yüzey ve yüzey altı kusurlar meydana gelmektedir. Bu oluşumlar ürünlerin sadece kullanılabilirliğini değil aynı zamanda aşınma dayanımı, yorulma mukavemeti ve korozyon direnci gibi mekanik özelliklerini de etkilemektedir. İşleme yöntemi, malzeme türü, mikroyapı ve fizikokimyasal reaksiyonlar gibi birçok faktöre bağlı olan bu yüzey kusurlarının önemli ölçüde üstesinden gelebilmek için bu faktörlerin her birinin etkileri dikkate alınmalıdır [1].

Bilimsel ve teknolojik gelişmelerle birlikte, mühendislik malzemelerinden beklenen performans ve kalite gibi özelliklere yönelik talepler artmaktadır. İmalat teknolojilerindeki yaşanan gelişmeler neticesinde, yüzey kalitesinin yanı sıra mekanik özellikler de mühendislik parçalarının ayırt edici özellikleri arasında yerini almıştır.

Özellikle havacılık-uzay, biyomedikal ve otomotiv sektöründe yüksek dayanımlı ve düşük ağırlıklı malzemelere olan talep giderek artmaktadır.

Titanyum ve alaşımları sahip oldukları yüksek dayanım, ısı ve korozyon direnci; düşük yoğunluk gibi üstün mekanik özelliklerinden dolayı bu beklentilerin büyük bir kısmını karşılamaktadır [2, 3]. Yer kabuğunun %6'sını oluşturan titanyum, sahip olduğu bu üstün özellikler sayesinde; vücut içi implant, protez ve ameliyat ekipmanları imalatı [4, 5]; uçak motorlarının giriş kanatçıkları, düşük ve yüksek basınç kompresör kanatçıklarının imalatı gibi yüksek teknolojinin kullanıldığı bir çok alanda kullanılmaktadır [6]. Mekanik olarak beklentileri karşılayan titanyum ve alaşımlarının çalışma koşulları da dikkate alındığında, ürünlerin yüzey kalitesinin oldukça yüksek olması gerekmektedir.

Ancak titanyum ve alaşımlarının işlenmesi sırasında bir takım sorunlarla karşılaşmaktadır [7]. Geleneksel talaşlı imalat sırasında, malzemenin sahip olduğu düşük termal iletkenlik ve yüksek mukavemet sebebiyle kesici takım ile iş parçası arasında yüksek sıcaklıklar meydana gelmekte ve talaş oluşumunu sağlayan plastik deformasyon zorlaşmaktadır. Öte yandan artan sıcaklıkla birlikte iş parçası ile kesici takım arasında kimyasal tepkimeler gerçekleşmekte ve sonuç olarak iş parçası kesici takımın yüzeyine yapışmakta ve hızla aşınarak işlenen yüzeyin kalitesini düşürmektedir [8]. Bu sebeple, titanyum ve alaşımlarının işlenmesinde genellikle geleneksel olmayan imalat yöntemleri tercih edilmektedir. Bu kapsamda kullanılan geleneksel olmayan yöntemlerden bir tanesi de elektro erozyon ile işleme (EEİ) yöntemidir.

EEİ yönteminde, vurum ve vurum ara süresince, yüzey ani ısınma ve soğumaya maruz kalmakta ve elektriksel işleme parametrelerinin seviyelerine de bağlı olarak yüzey ve yüzey altında mikroyapısal değişimler meydana gelmektedir. Dolayısıyla EEİ ile işlenen yüzeylerde sert ve kırılgan bir artık tabaka oluşmakta ve bu tabakada bulunan kılcal çatlaklar, artık gerilmeler ve yeniden katılaşmış eriyikler malzemenin başta yorulma dayanımı olmak üzere çalışma ömrünü ve diğer mekanik özelliklerini doğrudan etkilemektedir [9].

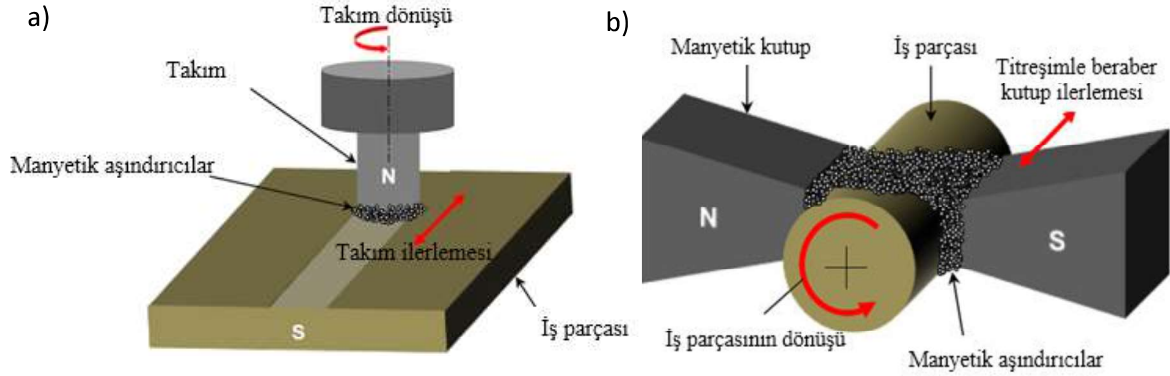
EEİ işlemi sonrası oluşan bu yapıların ortadan kaldırılması amacıyla birçok farklı yöntemin denendiği çalışmalar yapılmıştır. Yapılan çalışmalarda elektrot ya da iş parçasına ultrasonik titreşimler verilerek suretiyle, ara bölgede kaldırılan talaşların artan sıvı sirkülasyonu ile daha etkin bir şekilde uzaklaştırıldığı ve böylece yüzeyde eriyerek yeniden katılaşan tabaka kalınlığının azaldığı görülmüştür [10–12]. Diğer bir yöntem olarak dielektrik sıvısı içerisine aşındırıcı tozlar katılmak suretiyle yöntemin veriminin artırılması sağlanmıştır [13–16]. Ayrıca işlem esnasında malzeme yüzeyinin sert ve ince filmlerle kaplanması amacıyla, sıvı içerisine krom, grafit gibi tozlar katılarak malzemenin yüzey özelliklerini iyileştirmek de denenilen diğer bir yöntemdir [17–19].

Yapılan çalışmalar incelendiğinde, yöntemin veriminde artış olmasına rağmen iş parçası yüzeyinde bulunan yeniden katılaşmış yüzey tabakası ve çatlaklar gibi istenmeyen oluşumların azaldığı ancak tamamen ortadan kaldırılamadığı tespit edilmiştir. Bu oluşumların ortadan tamamen kaldırılabilmesi için malzeme yüzeyinin ayrıca bir bitirme işlemine tabi tutulması gerekmektedir [20]. Elektrokimyasal taşlama, mekanik taşlama ve bilyeli parlatma gibi yöntemler bu amaçla kullanılan yöntemlere örnek olarak gösterilebilir [21–23]. Ancak alışılmamış iyileştirme yöntemlerin oldukça maliyetli ve uygulamalarının sınırlı oldukları görülmektedir. Mekanik yüzey iyileştirme yöntemlerinde ise, mekanik etki ve yüksek kesme kuvvetleri nedeniyle yüzey işlenebilirliği zorlaşmaktadır. Diğer yandan, manyetik aşındırıcılarla işleme (MAİ) yöntemi de kolay uygulanabilirliği, esnek yapısı, mikro talaş kaldırma ve daha düşük kesme kuvvetleri gibi özelliklerinden dolayı, EEİ sonrasında oluşan artık tabakanın kaldırılmasında tercih edilebilir bir yöntemdir.

MAİ yöntemi, işleme kuvvetlerinin bir manyetik alan tarafından kontrol edildiği geleneksel olmayan bir imalat yöntemidir. Yöntemde iş parçası bir manyetik alan kaynağının kuzey ve güney kutupları arasına yerleştirilmektedir. İş parçası ile kutuplar arasında bulunan boşluğa ise manyetik olarak demir esaslı parçacıklar ve aşındırıcı olarak Al_2O_3 , SiC, B₄C, elmas vb. parçacıklardan oluşan bir karışım (manyetik aşındırıcı fırça takımı (MAFT)) yerleştirilmektedir. İş parçası ve/veya MAFT'nin göreceli hareketi neticesinde manyetik alan etkisinde bulunan MAFT çok noktadan kesme yaparak içerisinde bulunan aşındırıcı taneciklerin boyutlarına bağlı olarak mikro düzeyde talaş kaldırır. Bunun sonucunda iş parçası yüzeyinde; yüzey pürüzlülüğünde azalma, çapakların yok olması gibi geometrik özelliklerde; yüzey altında; gerilim katmanlarının yok olması gibi mekanik ve fiziksel

özelliklerde değişiklik olmasıyla yüzey kalitesi artmakta, yüzey tamlığı sağlanmakta, ürünün hizmet kalitesi ve süresi gelişmektedir.

Yöntemde kullanılan takım esnek olduğu için, silindirik yüzeyler, düzlemsel yüzeyler, formlu yüzeyler ve karmaşık şekilli yüzeyler kolaylıkla işlenebilmektedir. Yöntemin farklı yüzeyler için çalışma prensibi şematik olarak Şekil 1’de gösterilmektedir.



Şekil 1. MAİ yönteminin farklı yüzeylerde uygulanışı: a) düzlemsel yüzeyler, b) silindirik yüzeyler [24].

MAİ yöntemi üzerine yapılan çalışmalar incelendiğinde yöntemin ilk olarak 1929 [16] ve 1940 [17] yıllarında uygulamaya geçtiği, ancak yöntemin pratik hale gelmesi 1980’li yıllara tekabül etmektedir. Bu tarihten günümüze kadar olan süreçte konuyla ilgili çok sayıda deneysel ve teorik çalışmalar yapılmış olup bu çalışmaların başlıcaları bu bölümde özetlenmiştir.

Yapılan araştırmalar, MAİ yönteminin, silindirik, düzlemsel ve serbest formlu yüzeylerde başarıyla uygulanabildiğini göstermektedir.

Silindirik yüzeylerin MAİ yöntemiyle işlendiği çalışmalar incelendiğinde, MAİ yönteminin medikal alanda kullanılan kılcal borulardan günlük hayatta kullanılan ortalama boyutlardaki borulara kadar geniş bir alanda uygulama şansı bulunduğu görülmektedir [25–29].

Düzlemsel yüzeylerin MAİ yöntemiyle işlenmesi üzerine de yapılan çok sayıda çalışma bulunmakta olup bu çalışmalar genellikle işleme parametrelerinin yüzey kalitesi ve talaş kaldırma oranındaki etkileri üzerine yoğunlaşmaktadır [30–33].

Literatürde serbest formlu yüzeyler üzerine yapılan çalışmalar da mevcut olup bu çalışmalarda genellikle küresel şekilli manyetik kutup sistemleri kullanılmaktadır [34, 35].

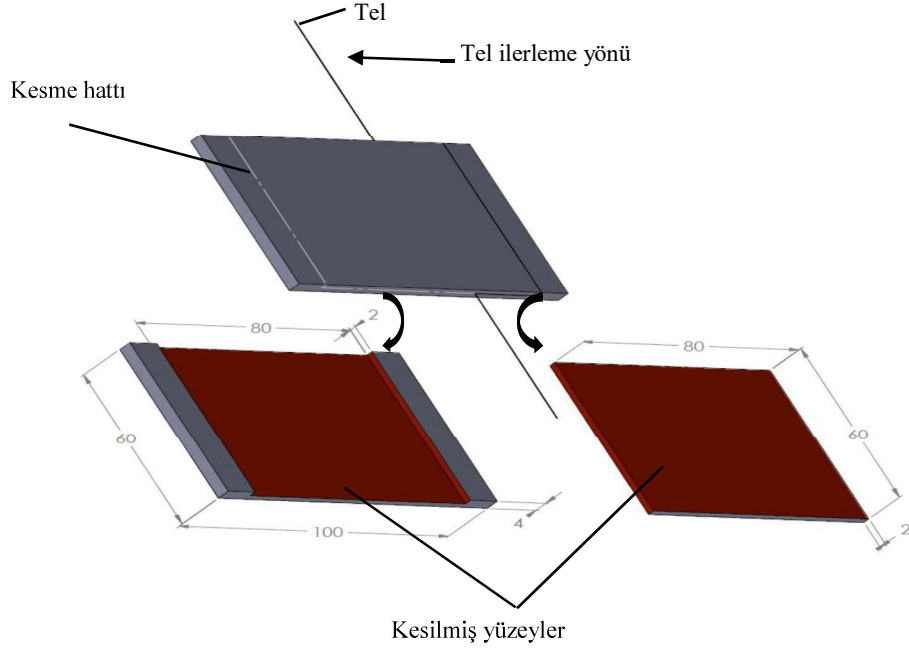
Öte yandan MAİ yönteminin işleme performansını artırmaya yönelik yapılan hibrit uygulamalar da mevcuttur. İş parçasına ve/veya manyetik takıma titreşim uygulamak, işleme bölgesine kimyasal çözücüler ilave etmek ya da bu uygulamaların birlikte kombinasyonlarını uygulamak MAİ yönteminin işleme performansını artırmaktadır [36–43].

Bu çalışmada tel erozyon ile işleme (TEİ) yöntemiyle kesilmiş Ti 6Al 4V alaşımından imal edilmiş olan numunelerin yüzey kalitelerinin MAİ yöntemiyle iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda MAİ yönteminde, aşındırıcı boyutu, devir sayısı, manyetik alan miktarı ve işleme süresi parametreleri farklı seviyelerde değiştirilerek işlem üzerindeki etkileri incelenmiştir. MAİ işlemi sonrası yüzey pürüzlülüğündeki iyileşme oranları (YPIÖ) ve talaş kaldırma oranları (TKO) belirlenmiştir. Numunelere ait taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri alınmış ve yüzey özellikleri ve artık tabaka yapıları incelenmiştir. Sonuç olarak MAİ yönteminin EEİ yöntemiyle işlenmiş yüzeylerin yüzey kalitelerinin artırılması için kullanılabilecek bir son işlem olduğu belirlenmiştir.

2. Deneysel Çalışmalar

2.1. Numunelerin TEİ Yöntemiyle Kesilmesi

Ticari olarak temin edilmiş olan 4 X 60 X 100 mm³ boyutlarındaki Ti 6Al 4V alaşımından imal edilmiş numuneler Charmilles Technologies marka Robofil 290 model tel erozyon tezgâhı ile Şekil 2’de gösterilen boyutlarda kesilmiştir. Kesme işlemi sırasında kullanılan parametreler Tablo 1’de görülmektedir. Ti 6Al 4V alaşımın mekanik özellikleri ve kimyasal içerikleri sırasıyla Tablo 2 ve Tablo 3’te verilmiştir.



Şekil 2. Numunelerin TEİ yöntemiyle kesilmesi.

Tablo 1. TEİ işleme parametreleri.

Kesme Parametresi	
Tel çapı (mm)	0.25
Vurum süresi (ns)	500
Gerilim (V)	100
Tel ilerleme hızı (m/dk)	5
Dielektrik basıncı (kg/cm ²)	5.5

Tablo 2. Ti 6Al 4V alaşımının mekanik özellikleri.

Özellik	
Sertlik (HV)	600
Erime noktası (°C)	1660
Maksimum çekme dayanımı (MPa)	832
Akma dayanımı (MPa)	745
Çentik darbe tokluğu (J)	34
Elastikiyet modülü (X10 ⁶ MPa)	11.3

Tablo 3. Ti 6Al 4V alaşımının kimyasal bileşimi.

Element	Ti	Al	V	Fe	O	C	N	H
%	89.464	6.08	4.02	0.22	0.18	0.02	0.01	0.0053

2.2. Deney Parametrelerinin Belirlenmesi

MAİ deneylerini etkileyen çok sayıda parametre olmasına rağmen daha önceki yapılan çalışmalar ve ön deneyler neticesinde işleme süresi, aşındırıcı boyutu, devir sayısı ve manyetik alan miktarı parametreleri 3'er farklı seviyede değiştirilmiştir. Çalışmada Manyetik aşındırıcılarla işleme deneyleri için Taguchi L₉ ortogonal dizin deneysel tasarımı kullanılmış olup deneylere ait işleme şartları Tablo 4'te verilmiştir. Deneylerde ilerleme miktarı

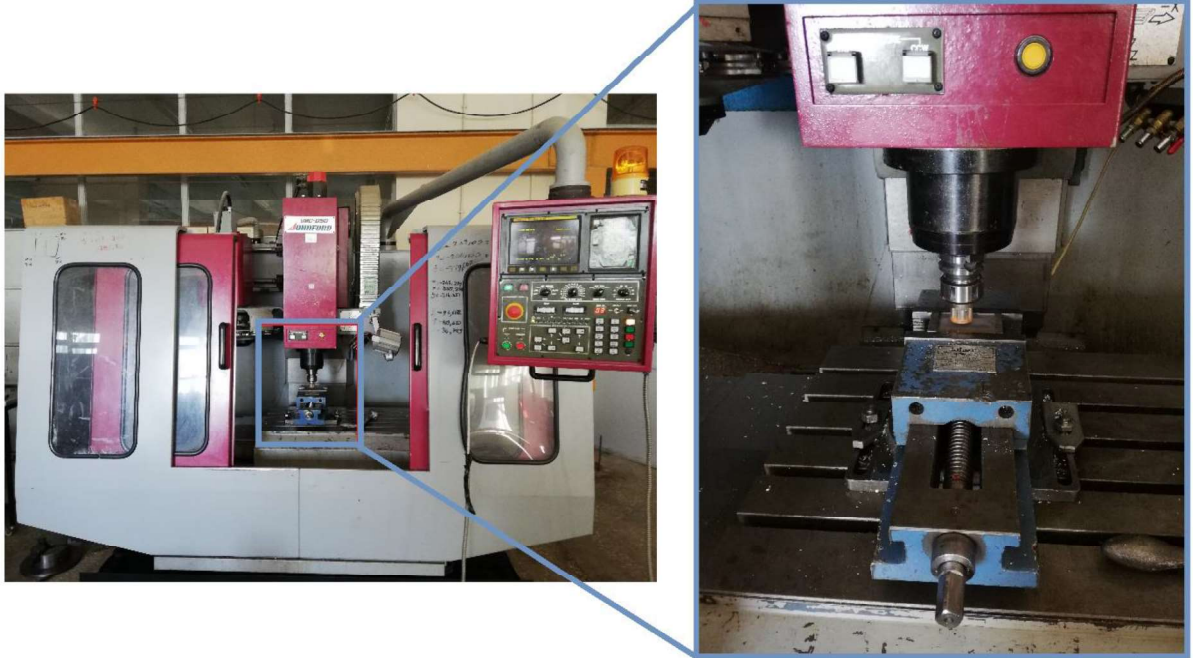
10 mm/dk, işleme boşluğu 2 mm, demir tozu boyutu 200 μm , demir tozu miktarı 3g, SiC miktarı 1 g ve yağlayıcı miktarı 0,2 g sabit tutulmuştur.

Tablo 4. Deneysel tasarım tablosu.

Deney No	İşleme Süresi (dk)	Aşındırıcı Boyutu (μm)	Devir sayısı (dev/dk)	Manyetik Alan (mT)	Deney No	İşleme Süresi (dk)	Aşındırıcı Boyutu (μm)	Devir sayısı (dev/dk)	Manyetik Alan (mT)
1	20	75	400	130	6	40	106	400	145
2	30	75	600	145	7	20	150	800	145
3	40	75	800	170	8	30	150	400	170
4	20	106	600	170	9	40	150	600	130
5	30	106	800	130					

2.3. Deney Düzenekinin Tasarımı

Deneyel çalışmaların yapılması için gerekli olan ekipmanlardan ticari olarak temin edilebilecek ekipmanlar ticari olarak temin edilmiş olup ticari olarak temin edilemeyen özel tasarıma sahip ekipmanlar ise SOLIDWORKS 2015 Paket programı aracılığıyla tasarlanmış ve talaşlı imalat ve eklemeli imalat yöntemleriyle imal edilmiştir. Deney düzeneğinin fotoğrafı Şekil 3'te görülmektedir.

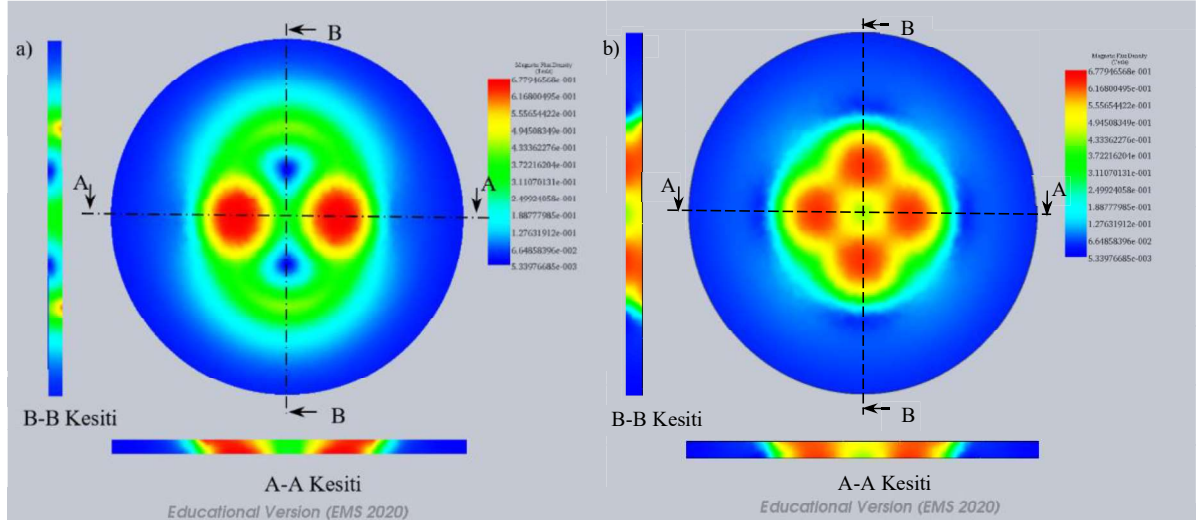


Şekil 3. Deney düzeneğinin fotoğrafı

2.4. Manyetik Kutup İmalatı

Deneylerde kullanılmak üzere 3 farklı manyetik kutup sistemi hazırlanmıştır. Manyetik kutup sistemleri, $\varnothing 10 \times 10$ mm, $\varnothing 10 \times 15$ mm ve $\varnothing 10 \times 20$ mm ölçülerine sahip mıknatıslar kullanılarak, her bir kutup sisteminde 4'er adet mıknatıs olacak şekilde mıknatısların özel olarak tasarlanmış ve 3 boyutlu yazıcı vasıtasıyla imal edilmiş olan tutuculara yerleştirildikten sonra bir kalıba konularak polyester reçine aracılığıyla $\varnothing 30 \times 50$ mm boyutlarında imalatı gerçekleştirilmiştir. Üretilen manyetik kutuplar dik işleme merkezi pensine monte edilerek kullanıma hazır hale getirilmiştir.

Mıknatısların oryantasyonu ise EMWorks 2020 paket programı aracılığıyla yapılan sonlu elemanlar analizleri ile belirlenmiştir. Şekil 4-a NSNS-S oryantasyona sahip manyetik kutup sisteminde iş parçası üzerine etki eden manyetik alan yoğunluğu dağılımı gösterilmektedir. Her ne kadar NSNS-S oryantasyonu NNNN-S oryantasyonuna sahip manyetik kutup sistemine kıyasla daha yüksek manyetik alan yoğunluğuna sahip olsa da, NNNN-S oryantasyonuna sahip manyetik kutup sisteminde yoğunluk daha homojen olarak dağılmıştır (Şekil 4-b). Bu sebeple deneylerde kullanılacak olan manyetik kutup sistemlerinde NNNN-S oryantasyonu tercih edilmiştir.



Şekil 4. İş parçası üzerine etkileyen manyetik alan dağılımı (a: NSNS-S oryantasyonu, b: NNNN-S oryantasyonu).

Manyetik alan yoğunluğunun MAİ üzerindeki etkilerini görebilmek için 3 farklı manyetik kutup sistemi imal edilmiş ve bu sistemlerin oluşturduğu manyetik alan yoğunluğu PCE marka MFM 3000 model manyetik alan ölçer cihazı ile kutup sistemleri boyunca ölçülmüştür. Yapılan ölçümler sonucu manyetik kutup sistemlerinin hat boyunca sahip oldukları ortalama manyetik alan yoğunlukları sırasıyla 130 mT, 145 mT ve 170 mT olarak tespit edilmiştir.

2.5. Deneyleri Yapılması

Deneyler Fırat Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Makine Mühendisliği bölümü laboratuvarında bulunan Johnford marka WMC 550 model CNC dik işleme merkezinde yapılmıştır.

Her bir deney numunesi, deneyler öncesinde ve sonrası üzerinde bulunan yabancı maddelerden arındırılmak amacıyla Struers marka Metason 120 T ultrasonik temizleyici aracılığıyla aseton (C₃H₆O) çözeltisi içerisinde temizlenmiştir. Yabancı maddelerden arındırılan numuneler, her bir deney öncesinde ve deney sonrasında 0.0001 gr hassasiyete sahip Precisa marka XB 220A model terazi ile tartılarak ağırlıkları ölçülmüştür.

Mengene üzerine yerleştirilen iş parçası üzerine mekanik olarak karıştırılmış manyetik aşındırıcı karışım dökülmüştür. Numune altında bulunan mıknatıs tarafından oluşturulan manyetik alanı sebebiyle numune üzerine dökülen karışım manyetik alan çizgileri boyunca dizilmek suretiyle iş parçası üzerinde bir fırça halini almıştır. Sonrasında fener mili üzerinde bağlı olan manyetik kutup CNC kontrolü ile işleme bölgesine işleme boşluğu 2 mm olacak şekilde yaklaştırılmış ve aşındırıcı karışımı üstte bulunan mıknatıslardan çıkıp altta bulunan mıknatısa yönelen manyetik alan çizgileri boyunca konumlanarak deneyler için hazır hale gelmiştir. Belirlenen parametrelere göre deneyler başarıyla gerçekleştirilmiştir.

3. Deneysel Sonuçlar ve Tartışma

3.1. Talaş Kaldırma Oranı Ölçüm Sonuçları

Talaş kaldırma oranları (TKO), numunelerin MAİ işlemi uygulanmadan ve MAİ işlemi uygulandıktan sonraki ağırlık farklarının işlem süresine bölünmeleri ve Eş.1 yardımıyla hesaplanmıştır.

$$TKO = \Delta m / t \quad (1)$$

TKO ölçüm sonuçları Tablo 5'te toplu şekilde verilmiştir. TKO değerlerinin işlem koşullarına bağlı olarak 2,265-5,813 mg/dk aralığında değiştiği görülmektedir. Ortalama TKO değeri 3,78 mg/dk olarak ölçülmüştür. Şekil 5'te işleme parametrelerinin TKO üzerindeki etkileri grafiksel olarak gösterilmektedir. Şekildeki kırmızı kesikli çizgi tüm deneylerin TKO değerinin aritmetik ortalamasını göstermektedir. Şekil incelendiğinde işleme süresinin artmasıyla TKO değeri azalmaktadır. Bu durum işlem süresince aşındırıcı taneciklerin sahip oldukları keskin

kesme kenarlarının sürtünme sebebiyle keskinliğini kaybetmesinden kaynaklanmaktadır. Sonuç olarak TKO üzerinde işleme süresinin 1. seviyesinin tercih edilebilir nitelikte olduğu görülmektedir.

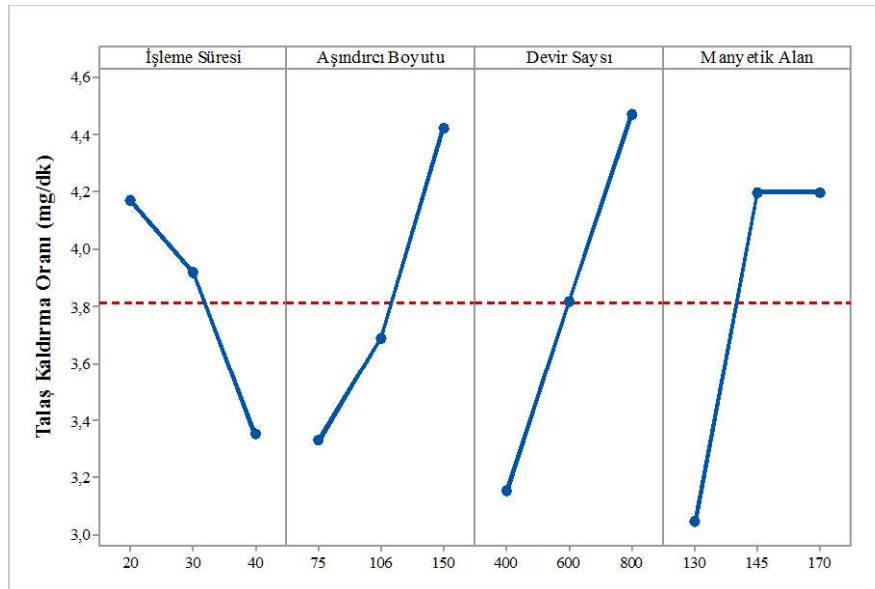
Aşındırıcı boyutunun 1. ve 2. seviyesinde yapılan deneyler sonucu ölçülen TKO değerlerinin yapılan tüm deneylerin ortalama TKO değerinin altında olduğu görülmektedir. Aşındırıcı boyutunun 3. seviyesinde ise en yüksek TKO değeri elde edilmiştir. Bu durum artan tanecik boyutuyla birlikte aşındırıcı-iş parçası temas uzunluğunun artması neticesinde birim zamanda kaldırılan talaş miktarının artması ile ilişkilendirilebilir.

MAİ yönteminde devir sayısının artması birim zamanda alınan yolu artırmaktadır. Dolayısıyla devir sayısının artmasıyla birlikte TKO değerleri de artmaktadır. Devir sayısının artması taneciklere etkiyen merkezciil kuvveti artırmaktadır, ancak manyetik kuvvetin tanecikleri bir arada tutacak büyüklükte olması taneciklerin dağılmasını engelleyecektir. Sonuç olarak devir sayısının en uygun parametresinin 3. seviye olan 800 dev/dk olduğu görülmektedir.

Manyetik alan miktarı aşındırıcı taneciklerin iş parçası yüzeyine batma derinliğini doğrudan etkileyen bir parametredir. Şekil incelendiğinde manyetik alan miktarının 1. seviyesinden 2. seviyesine geçildiğinde TKO değeri üzerinde bir artış meydana gelmektedir. Ancak 2. seviyeden 3. seviyeye geçildiğinde TKO üzerinde bir değişiklik oluşmamaktadır. Bu, manyetik kuvvetin aşındırıcı taneciklerin iş parçası yüzeyinde belirli bir derinliğe kadar saplanabilmesine, bu seviyeden sonra artan manyetik kuvvetin aşındırıcı tanecikler üzerindeki baskının artmasına, ancak artan baskının aşındırıcı taneciklerin daha derine saplanmasına yeterli olmayacağına ve talaş kaldırma oranı üzerinde bir etkiye neden olmayacağı anlamına gelmektedir. Sonuç olarak manyetik alan miktarı parametresinin en uygun seviyesinin 2. seviye olan 145 mT olduğu görülmektedir.

Tablo 5. Talaş kaldırma oranı ölçüm sonuçları

Deney No	Kaldırılan Talaş Miktarı (mg)	Talaş Kaldırma Oranı (mg/dk)	Deney No	Kaldırılan Talaş Miktarı (mg)	Talaş Kaldırma Oranı (mg/dk)	Deney No	Kaldırılan Talaş Miktarı (mg)	Talaş Kaldırma Oranı (mg/dk)
1	45,3	2,265	4	80,1	4,435	7	63,9	5,813
2	117,2	3,825	5	174,4	3,683	8	110,5	4,005
3	153	3,906	6	118,1	2,952	9	177,4	3,195



Şekil 5. İşleme parametrelerinin TKO üzerindeki etkileri.

3.2. Yüzey Pürüzlüğündeki İyileşme Oranı Ölçüm Sonuçları

Numunelerin TEİ işlemi sonrası ve MAİ işlemi sonrası yüzey pürüzlülük değerleri Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği bölümünde bulunan zygo ZeGage marka 3 boyutlu yüzey profilometresi aracılığıyla ölçülmüştür. Yüzey pürüzlülüğündeki iyileşme oranları ise Eş. 2 yardımıyla

hesaplanmıştır.

$$YPIO = \frac{Ra_i - Ra_s}{Ra_i} \times 100 \quad (2)$$

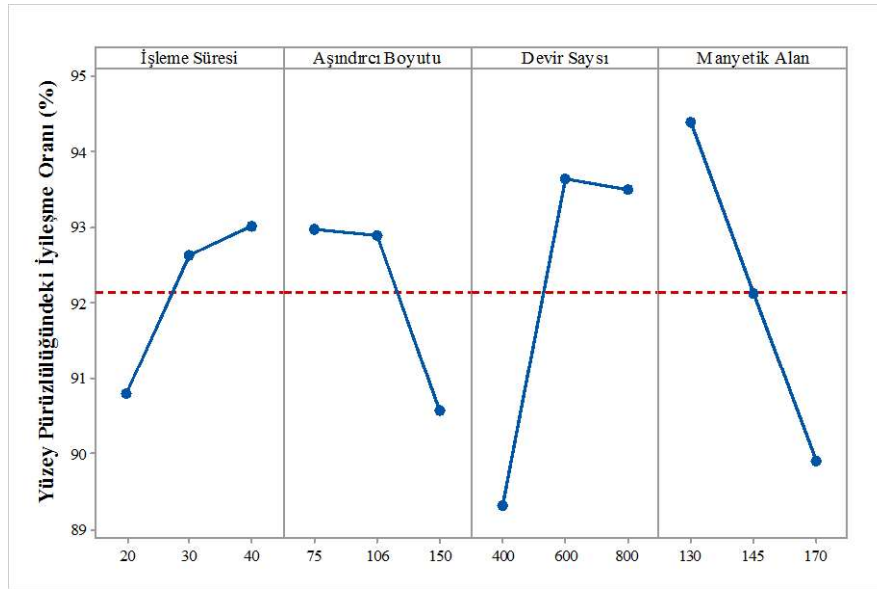
Burada Ra_i ve Ra_s sırasıyla, MAİ işlemi öncesi ve sonrası ortalama yüzey pürüzlülük değerini ifade etmektedir.

Numunelere ait yüzey pürüzlülük değerleri ve YPIO oranları Tablo 6'da görülmektedir. YPIO değerlerinin işlem koşullarına bağlı olarak %85,979-% 96,973 aralığında değiştiği görülmektedir. Ortalama YPIO değeri % 92,148 olarak ölçülmüştür. Şekil 6'da işleme parametrelerinin YPIO üzerindeki etkileri grafiksel olarak gösterilmektedir. Şekildeki kırmızı kesikli çizgi tüm deneylerin YPIO değerinin aritmetik ortalamasını göstermektedir. Şekil 7 ise numunelere ait 3 boyutlu yüzey görüntüleri görülmektedir.

Tablo 6. Yüzey pürüzlülüğü iyileşme oranı ölçüm sonuçları

Deney No	Ortalama Yüzey Pürüzlülük Değeri (μm)	Yüzey Pürüzlülüğünde İyileşme Oranı (%)	Deney No	Ortalama Yüzey Pürüzlülük Değeri (μm)	Yüzey Pürüzlülüğünde İyileşme Oranı (%)	Deney No	Ortalama Yüzey Pürüzlülük Değeri (μm)	Yüzey Pürüzlülüğünde İyileşme Oranı (%)
1	0,145	91,043	4	0,149	90,769	7	0,153	90,542
2	0,082	94,935	5	0,049	96,973	8	0,227	85,979
3	0,114	92,958	6	0,147	90,920	9	0,078	95,182

MAİ işlemi öncesi numunelerin ortalama yüzey pürüzlülük değeri =1,619 μm



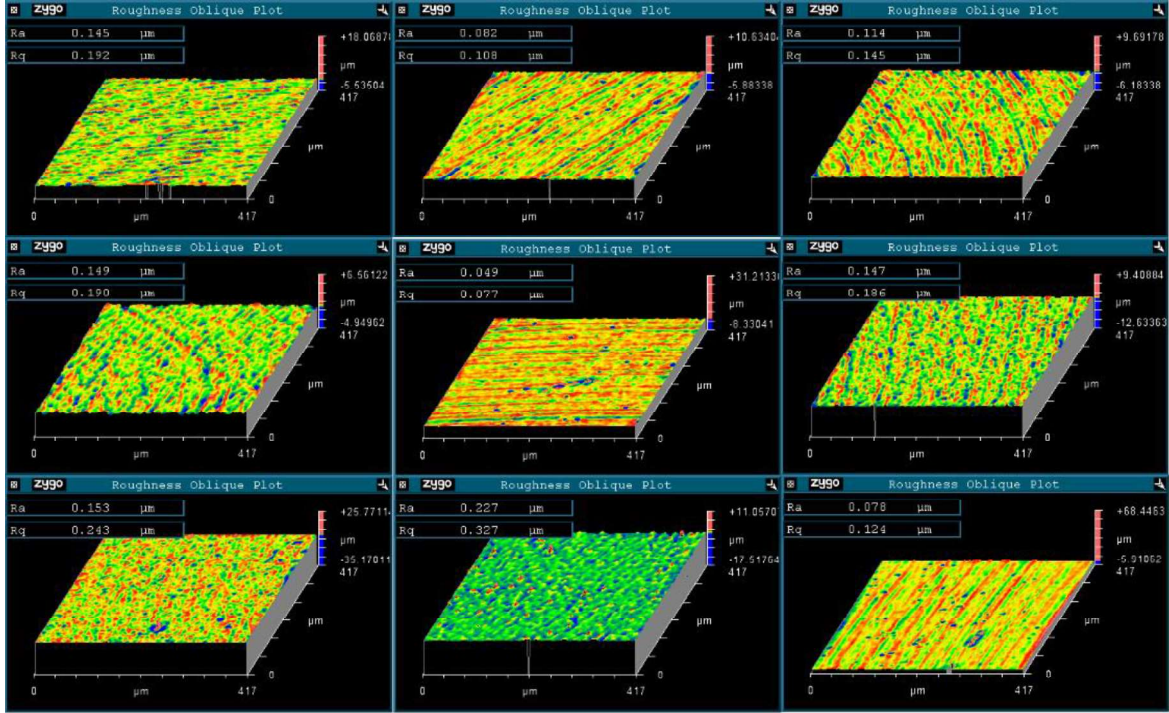
Şekil 6. İşleme parametrelerinin YPIO üzerindeki etkileri.

Şekil incelendiğinde işleme süresinin artmasıyla YPIO değeri artmaktadır. İşleme süresinin 1. Seviyesinden 2. seviyesine çıkmasıyla YPIO değerinde hızlı bir artış meydana gelirken, 2. seviyeden 3. seviyeye geçilmesiyle artış oranında bir azalma meydana gelmiştir. İşleme süresinin artmasıyla YPIO eğrisinin yatay bir hal alması beklenmektedir.

Aşındırıcı boyutunun artmasıyla iş parçası-aşındırıcı temas uzunluğu artmakta ve iş parçası yüzeyinde daha derin çizikler oluşturmak suretiyle talaş kaldırılmaktadır. Bu nedenle de aşındırıcı boyutunun artmasıyla YPIO değerinde azalma meydana gelmektedir.

Devir sayısının artmasıyla birim zamanda alınan yol arttığı için YPIO oranı artmaktadır. Ancak bu artış 2. seviyeden 3. seviyeye geçilmesiyle yerini azalışa bırakmaktadır. Bu durum merkezci kuvvetin etkisiyle aşındırıcıların dönme yönüne dik şekilde hareket etmiş olmaları sonucu yüzey pürüzlülük değerinde bir artışa sebebiyet vermesiyle ilişkilendirilebilir.

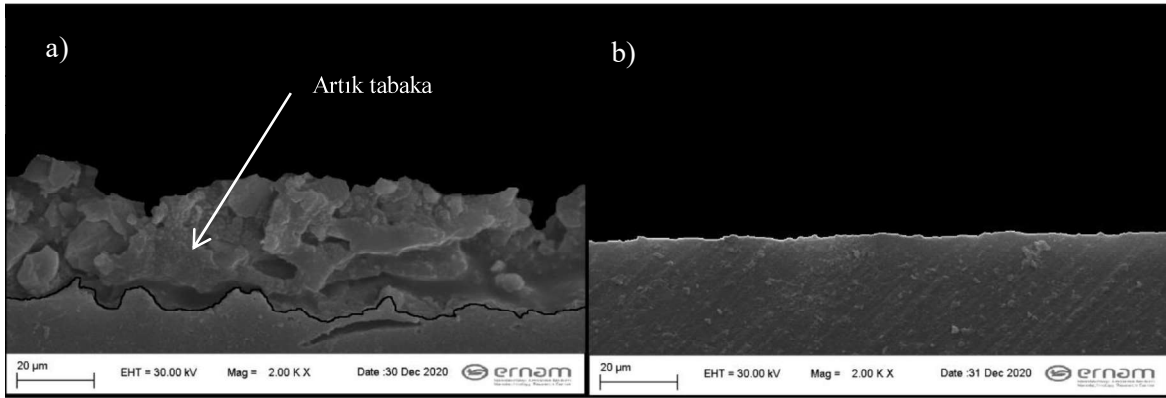
Manyetik alan miktarının artmasıyla aşındırıcıların iş parçası yüzeyinden daha derin çizikler halinde talaş kaldırılması neticesinde yüzey kalitesi daha düşük manyetik alan miktarlarına kıyasla azalmaktadır.



Şekil 7. Numunelerin MAİ işlemi sonrası yüzey topografyaları.

3.3. Artık Tabaka Kalınlığı Ölçüm Sonuçları

TEİ ile kesim sonrası iş parçası yüzeyinde oluşan artık tabakalar ve MAİ işlemi sonrası yüzey özellikleri Erciyes Üniversitesi Nano Teknoloji Araştırma Merkezi bünyesinde bulunan ZEISS LS-10 Life Science Taramalı Elektron Mikroskobu aracılığıyla incelenmiş olup MAİ işlemi öncesi belirgin halde görülen artık tabaka, MAİ işlemi sonrasında tamamen kaldırılmıştır (Şekil 8.)



Şekil 8. a: MAİ işlemi öncesi b: MAİ işlemi sonrası yüzey görüntüsü.

4. Sonuçlar

Bu çalışmada, sanayide oldukça geniş kullanılan Ti 6Al 4V alaşımı TEİ yöntemiyle kesildikten sonra oluşan yüzeyin yüzey kalitesinin iyileştirilmesi amacıyla ileri imalat yöntemlerinden olan MAİ yöntemi ile işlenmiş ve deneyler sonrasında TKO, YPIÖ ve artık tabaka kalınlıkları ölçülerek işlem parametrelerinin etkileri belirlenmiştir.

Deneyler sonucunda, işleme süresinin artmasıyla TKO değerlerinde azalış meydana gelirken YPIÖ değerlerinin artmakta olduğu; aşındırıcı boyutunun artmasıyla TKO değerleri artarken YPIÖ değerlerinin azaldığı; devir sayısındaki artışın hem TKO hem de YPIÖ değerlerinde artışa sebep olduğu, ancak YPIÖ değerindeki artışın belirli bir seviyede sınırlandırıldığı; manyetik alan miktarındaki artışın TKO değerinde artışa sebep olurken YPIÖ değerinde azalışa sebep olduğu tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlar literatürde yapılan çalışmalarla karşılaştırıldığında sonuçların tutarlı olduğu görülmüştür [27-34].

Öte yandan yapılan deneyler neticesinde bütün numunelerde TEİ ile kesim sonrasında numune yüzeyinde meydana gelen artık tabakanın MAİ işlemi sonrasında tamamen kaldırıldığı tespit edilmiştir.

Sonuç olarak MAİ yönteminin EEİ yöntemiyle işlenmiş yüzeylerin yüzey kalitelerinin artırılması için kullanılabilecek bir son işlem olduğu belirlenmiştir.

Teşekkür

Bu çalışma Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri birimi tarafından 07/2020-04 no'lu proje kapsamında desteklenmiştir.

Kaynaklar

- [1] Yang S, Li W, Yan, S, & Li W. Surface Quality and Finishing Technology. In: Surface Finishing Theory and New Technology. Berlin: Springer Heidelberg, 2018; pp.1-63.
- [2] Chen S L, Yan B H, & Huang F Y. Influence of kerosene and distilled water as dielectrics on the electric discharge machining characteristics of Ti-6Al-4V. J Mater Process Tech 1999; 87(1-3): 107-111.
- [3] He P, Zhang J, Zhou R, & Li X. Diffusion bonding technology of a titanium alloy to a stainless steel web with an Ni interlayer. Mater Charact 1999; 43(5): 287-292.
- [4] Uzun İ H, Bayındır F. Dental Uygulamalarda Titanyum ve Özellikleri. Atatürk Üniv. Diş Hek. Fak. Derg. 2010; 20(2): 213-220.
- [5] Murr L E, Quinones S A, Gaytan S M, Lopez M I, Rodela A, Martinez, E Y, ... Wicker R B. Microstructure and mechanical behavior of Ti-6Al-4V produced by rapid-layer manufacturing, for biomedical applications. J Mech Behav Biomed 2009; 2(1): 20-32.
- [6] Ulutan D, Ozel T. Machining induced surface integrity in titanium and nickel alloys: A review. Int. J. Mach. Tools Manuf. 2011; 51(3): 250-280.
- [7] Çelik Y H, Kiliçkap, E. Titanyum Alaşımlarından Ti-6Al-4V'nin İşlenmesinde Karşılaşılan Zorluklar: Derleme. GU J Sci, Part C 2018; 6(1): 163-175.
- [8] Minton T, Ghani S, Sammler, F, Bateman R, Fürstmann P, Roeder M. Temperature of internally-cooled diamond-coated tools for dry-cutting titanium. Int. J. Mach. Tools Manuf. 2013; 75: 27-35.
- [9] Manjaiah M, Narendranath S, Basavarajappa S. (2014). A review on machining of titanium based alloys using EDM and WEDM. Rev. Adv. Mater. Sci. 2014; 36(2): 89-111.
- [10] Shabgard M R, Alenabi H. Ultrasonic Assisted Electrical Discharge Machining of Ti-6Al-4V Alloy. Mater. Manuf. Processes 2015; 30(8): 991-1000.
- [11] Lin Y C, Hung J C, Chow H M, Wang A C, Chen J T. Machining Characteristics of a Hybrid Process of EDM in Gas Combined with Ultrasonic Vibration and AJM. Procedia CIRP 2016; 42:167-172.
- [12] Shabgard M R, Gholipour A, Mohammadpourfard M. Numerical and experimental study of the effects of ultrasonic vibrations of tool on machining characteristics of EDM process. Int. J. Adv. Manuf. Technol. 2018; 96(5-8): 2657-2669.
- [13] Le V T, Banh T L, Tran X T, Thi H M N. Surface Modification Process by Electrical Discharge Machining with Tungsten Carbide Powder Mixing in Kerosene Fluid. Applied Mechanics and Materials 2019; 889: 115-122.
- [14] Kumar V, Kumar A, Kumar S, Singh N K. Comparative study of powder mixed EDM and conventional EDM using response surface methodology. In Mater. Today.. Proc. 2018; 5:18089-18094.
- [15] Shard A, Shikha D, Gupta V, Garg M P. Effect of B4C abrasive mixed into dielectric fluid on electrical discharge machining. J. Braz. Soc. Mech. Sci. Eng. 2018; 40(12): 554.
- [16] Kolli M, Kumar A. Assessing the Influence of Surfactant and B4C Powder Mixed in Dielectric Fluid on EDM of Titanium Alloy. Silicon 2019; 11(4): 1731-1743.
- [17] Toshimitsu R, Okada A, Kitada R, Okamoto Y. Improvement in Surface Characteristics by EDM with Chromium Powder Mixed Fluid. Procedia CIRP 2016; 42: 231-235.
- [18] Nguyen T D, Nguyen P H, Banh L T. Die steel surface layer quality improvement in titanium μ -powder mixed die sinking electrical discharge machining. Int. J. Adv. Manuf. Technol. 2019; 100(9-12): 2637-2651.
- [19] Unsies E, Cogun C. Improvement of Electric Discharge Machining (EDM) Performance of Ti-6Al-4V Alloy with Added Graphite Powder to Dielectric. Strojniški vestnik – Journal of Mechanical Engineering 2015; 61(6): 409-418.
- [20] Çaydaş U, Ti6Al4V Alaşımının Elektro Erozyon Ve Elektro Kimyasal İşleme Yöntemleriyle İşlenebilirliğinin Araştırılması. Doktora tezi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, 2008.
- [21] Yan B H, Wang C C, Chow H M, Lin Y C. Feasibility study of rotary electrical discharge machining with ball

- burnishing for Al₂O₃/6061Al composite. *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 2000; 40(10): 1403–1421.
- [22] Hasçalik A, Çaydaş U. Electrical discharge machining of titanium alloy (Ti-6Al-4V). *Appl. Surf. Sci.* 2007; 253(22): 9007–9016.
- [23] Wang C C, Chow H M, Yang L D, Lu C Te. Recast layer removal after electrical discharge machining via Taguchi analysis: A feasibility study. *J. Mater. Process. Technol.* 2009; 209(8): 4134–4140.
- [24] Kang J. Development of high-speed internal finishing and cleaning of flexible capillary tubes by magnetic abrasive finishing. Doctoral thesis, University of Florida, Florida, 2012.
- [25] Kang J, George A, Yamaguchi H. High-speed internal finishing of capillary tubes by magnetic abrasive finishing. In *Procedia CIRP* 2012; 1: 414–418.
- [26] Wang Y, Shih A, Nteziyaremye V, Li W, Yamaguchi H. Surface Finishing of Needles for High-performance Biopsy. *Procedia CIRP* 2014; 14: 48–53.
- [27] Li W, Li X, Yang S, Li W. A newly developed media for magnetic abrasive finishing process: Material removal behavior and finishing performance. *J. Mater. Process. Technol.* 2018; 260: 20–29.
- [28] Kajal S, Jain V K, Ramkumar J, Nagdeve L. Experimental and theoretical investigations into internal magnetic abrasive finishing of a revolver barrel. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2018; 100(5–8): 1105–1122.
- [29] Yamaguchi H, Shinmura T. Internal finishing process for alumina ceramic components by a magnetic field assisted finishing process. *Precis. Eng.* 2004; 28(2): 135–142.
- [30] Mulik R S, Pandey P M. Magnetic abrasive finishing of hardened AISI 52100 steel. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2011; 55(5–8): 501–515.
- [31] Wu J Z, Zou Y H. Study on an ultra-precision plane magnetic abrasive finishing process by use of alternating magnetic field. *Applied Mechanics and Materials* 2013; 395–396: 985–989.
- [32] Jiao A Y, Quan H J, Li Z Z, Zou Y H. Study on improving the trajectory to elevate the surface quality of plane magnetic abrasive finishing. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2015; 80(9–12): 1613–1623.
- [33] Kanish T C, Narayanan S, Kuppan P, Denis A S. Investigations on wear behavior of Magnetic Field Assisted Abrasive Finished SS316L material. *Mater. Today: Proc.* 2018; 5: 12734–12743.
- [34] Lin C T, Yang L D, Chow H M. Study of magnetic abrasive finishing in free-form surface operations using the Taguchi method. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2007; 34(1–2): 122–130.
- [35] Vahdati M, Rasouli S A. Evaluation of Parameters Affecting Magnetic Abrasive Finishing on Concave Freeform Surface of Al Alloy via RSM Method. *Adv. Mater. Sci. Eng.* 2016; 2016: 1–14.
- [36] Yin S, Shinmura T. Vertical vibration-assisted magnetic abrasive finishing and deburring for magnesium alloy. *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 2004; 44(12–13): 1297–1303.
- [37] Mulik R S, Pandey P M. Ultrasonic assisted magnetic abrasive finishing of hardened AISI 52100 steel using unbonded SiC abrasives. *Int. J. Refract. Met. Hard Mater* 2011; 29(1): 68–77.
- [38] Misra A, Pandey P M, Dixit U S. Modeling and simulation of surface roughness in ultrasonic assisted magnetic abrasive finishing process. *Int. J. Mech. Sci.* 2017; 133: 344–356.
- [39] Misra A, Pandey P M, Dixit U S. Modeling of material removal in ultrasonic assisted magnetic abrasive finishing process. *Int. J. Mech. Sci.* 2017; 131–132: 853–867.
- [40] Liu G Y, Guo Z N, Jiang S Z, Qu N S, Li Y. B. A study of processing Al 6061 with electrochemical magnetic abrasive finishing. *Procedia CIRP* 2014; 14: 234–238.
- [41] Sihag N, Kala P, Pandey P M. Chemo assisted magnetic abrasive finishing: Experimental investigations. *Procedia CIRP* 2015; 26: 539–543.
- [42] Pandey K, Pandey P M. Use of chemical oxidizers with alumina slurry in Double Disk Magnetic Abrasive Finishing for improving surface finish of Si (100). *J. Manuf. Processes* 2018; 32: 38–150.
- [43] Singh G, Kumar H, Kansal H K, Srivastava A. Effects of chemically assisted magnetic abrasive finishing process parameters on material removal of inconel 625 tubes. *Procedia Manufacturing* 2020; 48: 466–473.