

AKÜ FEMÜBİD 18 (2018) 015901 (676-683)

AKU J. Sci. Eng.18 (2018) 015901 (676-683)

DOI: 10.5578/fmbd.66968

Tel Erozyon ile Kesmede Farklı Tel Elektrotların ve Soğutma Yöntemlerinin Yüzey Pürüzlülüğü Üzerine Etkisi

Hüseyin GÜRBÜZ¹, Şehmus BADAY², İbrahim HAMARAT³¹Batman Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 72100, Batman.²Batman Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Makine ve İmalat Mühendisliği Bölümü, 72100, Batman.³Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Endüstriyel Tasarım Mühendisliği Bölümü, 06500, Ankara.

e-posta:huseyin.gurbuz@batman.edu.tr

Geliş Tarihi:02.02.2017 ; Kabul Tarihi:03.08.2018

Özet

Anahtar kelimeler

Tel erozyon; Tel elektrotlar; Soğutma yöntemi; Yüzey pürüzlülüğü.

Tel erozyon ile işlemede, makine performansının değerlendirmesinde en önemli kriterlerden biri yüzey pürüzlülüğüdür. Bu çalışmada, tel erozyonla işlemede farklı malzemelerden yapılmış tel elektrotların ve farklı soğutma tekniklerinin farklı iş parçası malzemelerinin yüzey pürüzlülüğüne etkisi deneysel olarak araştırılmıştır. Deney malzemesi olarak AISI D2 takım çeliği ve AISI 304 paslanmaz çelik, tel elektrot olarak pirinç, bakır ve çinko kaplı pirinç teller ve soğutma yöntemi olarak ise püskürtmeli ve daldırılmış yöntem kullanılmıştır. Kare şeklinde işlenen numunelerin farklı tip elektrotlara, soğutma yöntemlerine ve iş parçası malzemesine bağlı olarak yüzey pürüzlülük sonuçları değerlendirilmiştir. Elektrot tipine bağlı olarak en düşük yüzey pürüzlülük değerleri çinko kaplı pirinç tel elektrotlarla elde edilirken en yüksek yüzey pürüzlülük değerleri ise kaplamasız pirinç tel elektrotlarla elde edilmiştir. AISI D2 malzemesinden elde edilen yüzey pürüzlülük değerleri AISI 304 malzemesine göre daha iyi sonuçlara verdiği tespit edilmiştir. Soğutma yöntemine göre değerlendirildiğinde, en iyi yüzey pürüzlülük değerleri püskürtmeli soğutmayla işlemede elde edilmiştir.

Effects of Different Wire Electrodes and Cooling Methods on Surface Roughness In Wire Electro Discharge Machining

Abstract

Keywords

WEDM; Wire electrodes; Cooling methods; Surface roughness.

One of the most important criteria in assessing machine performance in wire electro discharge machining technology is surface roughness. In this study, the effects of wire electrodes made from different materials and cooling techniques on surface roughness of various workpiece materials were experimentally investigated in wire electro discharge machining. As test materials, AISI D2 tool steel and AISI 304 stainless steel and as wire electrodes, brass, copper and zinc coated brass wires and as cooling method, flushing and submerged techniques were used. Surface roughness results of square shaped machining samples were evaluated depending on different types of electrodes, cooling methods, and workpiece materials. Depending on the type of the electrode, while the lowest surface roughness values were obtained with zinc coated brass wire electrodes, the highest surface roughness values were obtained with uncoated brass wire electrodes. It was found that surface roughness values obtained from AISI D2 material gave better results compared to AISI 304 material. When it was assessed in terms of cooling techniques, the best surface roughness values were obtained while machining with flush cooling.

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

1. Giriş

Günümüz imalat sanayisi, iş parçalarını yüksek hassasiyetle işleme eğiliminde ilerlemektedir (Lin et al. 2001). Yüksek hassasiyetli iş parçalarını işlemek için kullanılan imalat yöntemlerinden biri de geleneksel olmayan tel erozyon ile işleme yöntemidir (Kuriakose and Shunmugam 2004, Hewidy et al. 2005, Kuriakose and Shunmugam 2005, Sanchez et al. 2007, Cabanes et al. 2008,

Newton et al. 2009, Aliasa et al. 2012, Chinnadurai and Arungalai 2015, Dabade and Karidkar 2016, Sharma et al. 2016). Tel elektro erozyon tezgahları (WEDM=Wire Electrical Discharge Machine) çeşitli imalat alanlarındaki işlenmesi zor olan malzemelerde ve özellikle kalıp endüstrisinde iş parçalarının hassas bir şekilde işlenmesinde önemli

bir rol oynamaktadır (Huang et al. 1999, Kuriakose and Shunmugam 2004, Herreroa et al. 2008, Aliasa et al. 2012, Chinnadurai and Arungalai 2015, Dabade and Karidkar 2016,). Tel erozyon ile işlemin en büyük avantajı, malzemelerin mekanik özelliklerden bağımsız olarak (sertlik, kırılabilirlik, dayanım v.b.) yüksek doğruluk derecesi ile karmaşık şekilli iş parçalarının üretilmesidir (Cabaneset al. 2008). Birçok araştırmacı, tel erozyon ile işlemede makine performansının değerlendirilmesinde en önemli parametrelerden birinin yüzey pürüzlülüğü olduğunu öne sürmüşlerdir (Huang et al. 1999, Kuriakose and Shunmugam 2004, Hewidy et al. 2005, Aliasa et al. 2012, Dabade and Karidkar 2016).

Hewidy ve ark. (2005), Inconel 601 malzemesini pirinç tel kullanarak kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne etkisini araştırmıştır. Bu araştırmada tel gerginliği ve sıvı basıncı arttıkça yüzey pürüzlülüğünün azaldığını ifade etmişlerdir. Newton ve ark. (2009), Inconel 718 malzemeyi çinko (Zn) kaplamalı bakır telle işlemiş ve işleme yüzeyinin karakteristiğini incelemişlerdir. Yüzey pürüzlülüğü üzerinde en etkili parametrenin kıvılcım enerjisi daha sonra ise tel çapının olduğunu tespit etmişlerdir. Dabade ve ark. (2016) Inconel 718 malzemesinin işleme sonucu oluşan yüzey pürüzlülüğü üzerinde işleme parametrelerinin etkisini araştırmışlardır. Yaptıkları çalışmada elde edilen yüzey pürüzlülüğü değerleri üzerinde en etkili parametrelerin vuruş süresi, tel gerginliği ve kıvılcım aralığı voltajı olduğunu vurgulamışlardır. Bu üç parametrenin artmasına bağlı olarak yüzey pürüzlülüğü değerlerini düşüğünü tespit etmişlerdir. Alias ve ark. (2012) pirinç tel elektrot kullanarak Titanium Ti-6Al-4V alaşımını akım, tel hızı, tel gerginliği ve voltajı gibi işleme parametrelerini sabit değerler olarak ilerleme oranının yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Çalışmalarında ilerleme oranının artışına bağlı olarak yüzey pürüzlülüğünü iyileştirdiğini vurgulamışlardır. Liao ve ark. (1997) tel elektrot erozyondaki işleme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü üzerine etkisiyle ilgili bir çalışma yapmışlardır. Çalışmada, yüzey pürüzlülüğü üzerinde en etkili parametrenin vuruş süresi

olduğunu bulmuşlardır. Rozenek ve ark. (2001) tel erozyonda metal matrisli kompozit malzeme ve pirinç tel kullanarak vuruş süresi, vuruş ara süresi, deşarj akımı ve voltaj gibi işleme parametrelerinin kesme hızı ve yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Çalışma neticesinde vuruş süresi ve akımın artmasına bağlı olarak artan boşalım enerjisi kesme hızı ve yüzey pürüzlülüğü değerlerini arttırdığını vurgulamışlardır. Soundararajan ve ark. (2016) sıkıştırılabilir döküm A4313 alaşımının tel elektrot erozyon ile işlenmesi sonucu oluşan yüzey pürüzlülüğü üzerine vuruş süresi, vuruş ara süresi ve maksimum akımın etkisini incelemişlerdir. Yazarlar, vuruş süresi ve maksimum akımın artması yüzey pürüzlülüğünü arttırdığını vuruş ara süresinin artmasına bağlı olarak ise yüzey pürüzlülüğü değerlerinin düşüğünü bulmuşlardır. Zhang (2014), nanokompozit seramik malzemenin tel elektrot erozyon ile işlenmesi sonucunda işleme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü üzerinde etkisini araştırmıştır. Çalışmasında tel elektrot erozyon tezgahının güç transistör sayısı ile yüzey pürüzlülüğünün değiştiğini güç transistör sayısı arttıkça yüzey pürüzlülüğünün arttığını bulmuştur. Manjaiah ve ark. (2015) şekil hafızalı alaşım olan $Ti_{50}Ni_{50-x}Cu_x$ iş parçası malzemesini farklı tip elektrotlarla işlendiğinde elde edilen yüzey pürüzlülük sonuçlarını değerlendirmişlerdir. Çinko kaplı teli ile işlenmesinde elde ettikleri yüzey pürüzlülük değerleri pirinç tel ile elde edilen yüzey pürüzlülük değerlerinden daha düşük çıktığını bulmuşlardır. Ayrıca işleme parametrelerini yüzey pürüzlülük üzerinde etkisi araştırmışlardır. Elde edilen sonuçlara bağlı olarak vuruş süresinin artmasına bağlı olarak yüzey pürüzlülüğünün kötüleştiğini bulmuşlardır. Liu ve ark. (2014) tarafından şekil hafızalı alaşımların tel elektrot erozyon ile işlenmesi sonucu oluşan yüzey pürüzlülük ile ilgili bir çalışma yürütmüşlerdir. Sharma ve ark. (2015) Inconel 706'nın türbin disk uygulaması için WEDM performans özelliklerinin değerlendirilmesiyle ilgili bir çalışma yapmışlardır. Yapmış oldukları çalışmada vuruş süresi arttıkça yüzey pürüzlülüğünün arttığını vuruş ara süresi arttığında ise azaldığını tespit etmişlerdir. Fard ve ark. (2013) metal matris kompozit malzemesinin tel elektrot erozyon

ileişlenmesinde vurum süresi, vurum ara süresi ve tel ilerleme gibi işleme parametrelerin yüzey pürüzlülüğü üzerine etkisini araştırmışlardır. Yapmış oldukları çalışmada vurum süresi ve tel ilerleme oranı artıkça yüzey pürüzlülüğün kötüleştiğini vurum ara süresi arttığında ise iyileştiğini bulmuşlardır.

Yukarıda bahsedilen çalışmalarda genellikle yüzey pürüzlülüğü üzerine vurum süresi, vurum ara süresi, deşarj akımı, tel gerginliği v.b. parametrelerin etkileri incelenmiştir. Oysaki yapılan bu deneysel çalışmada ise üç farklı tip elektrot iki farklı tip soğutma ve iki farklı iş parçası malzemesi parametrelerine bağlı olarak tel elektro erozyon teknolojisinde makine performansını değerlendirmesinde en önemli kriterlerden biri olan yüzey pürüzlülük üzerindeki etkisi araştırılmıştır.

2. Materyal ve Metot

2.1. İş parçası malzemesi

Deneysel çalışmalarda 300x80x25 mm ebadındaki prizmatik malzemelerden 10x10x25 mm malzemeler çıkarılmıştır. Deneylerde iş parçası malzemeleri olarak sac-metal kalıplarında en çok tercih edilen soğuk iş takım çeliği 1.2379 (AISI D2) ve Ekstrüzyon kalıplarında, havacılık, gıda, medikal sektörlerinde çok kullanılan AISI 304 paslanmaz çelikler kullanılmıştır. Bu malzemelere ait kimyasal bileşimler ve elektrik özdirençleri Çizelge 1-2'de verilmiştir.

Çizelge 1. AISI 304 çeliğin bileşenleri ve elektrik özdirenç

C%	Si%	Mn%	P%	S%	Cr%	N%	Ni%	Elektrik özdirenç (ρ)
0,07	1,00	2,00	0,045	0,030	17,5-19,5	0,11	8,0-10,5	710
$\pm 0,01$	$+0,05$	$\pm 0,04$	$+0,005$	$\pm 0,005$	$\pm 0,20$	$\pm 0,01$	$\pm 0,10$	

Çizelge 2. AISI D2 çeliğin bileşenleri ve elektrik özdirenç

C%	Si%	Mn%	Cr%	Mo%	V%	Elektrik özdirenç (ρ)
1,55	0,3	0,4	11,8	0,8	0,8	650

2.2. Tel Elektrotlar

Deneylerde üç farklı tel elektrot kullanılmıştır. Bu tel elektrotların çapları ve fiziksel özellikleri Çizelge 3'te gösterilmiştir.

Çizelge 3. Tel elektrotların fiziksel özellikleri

Tel Elektrot	Çekme Dayanımı	Kırılma Dayanımı	İletkenlik %
0.25 Pirinç	980 MPa	48.2 N	22
0.25 Çinko (Zn) Kaplı Pirinç	883 MPa	43.3 N	20
0.25 Bakır	520 MPa	36 N	25

2.3. Tel erozyon tezgâhı parametreleri ve soğutma yöntemi

Kesme işlemleri Makino U32 tip Tel Erozyon tezgâhında gerçekleştirilmiştir. İşleme deneylerimde soğutma yöntemi olarak Püskürtmeli ve Daldırılmış (Sub Merged) yöntem kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan tezgâh parametreleri tezgâh üreticisinin önerdiği parametreler dikkate alınarak Çizelge 4'te verilmiştir.

2.4. Yüzey pürüzlülüğü ölçümü

Deneylerde kullanılan iş parçası malzemeleri üzerinden ölçülen yüzey pürüzlülük değerleri için perthometer M1 model masa tipi yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazı kullanılmıştır. Yüzey pürüzlülük değerleri her bir numunenin üç yüzeyinden üçer kere, toplam dokuz değer alınıp aritmetik ortalamaları alınarak hesaplanmıştır.

Çizelge 4. Makina parametreleri

Deneylerde kullanılan işleme parametreleri	
Vurum süresi (On time), (μ s)	15
Vurum ara zamanı(Off time),(μ s)	50
Akım (Current),(Amp)	39
Kontak akımı (Ignition current), (A)	39
Gerilim (Voltage),(V)	40
Su basıncı (Water pressure),(Mpa)	30-40
Tel Hızı (Wire feed),(m/dak)	10

2.5. Deney numunelerinin işleme şartları

Deneylerde üç farklı tel elektrot, iki farklı malzeme ve soğutma yöntemi kullanılarak toplam 12 adet

kesme deneyi gerçekleştirilmiş olup Çizelge 5'te gösterilmektedir.

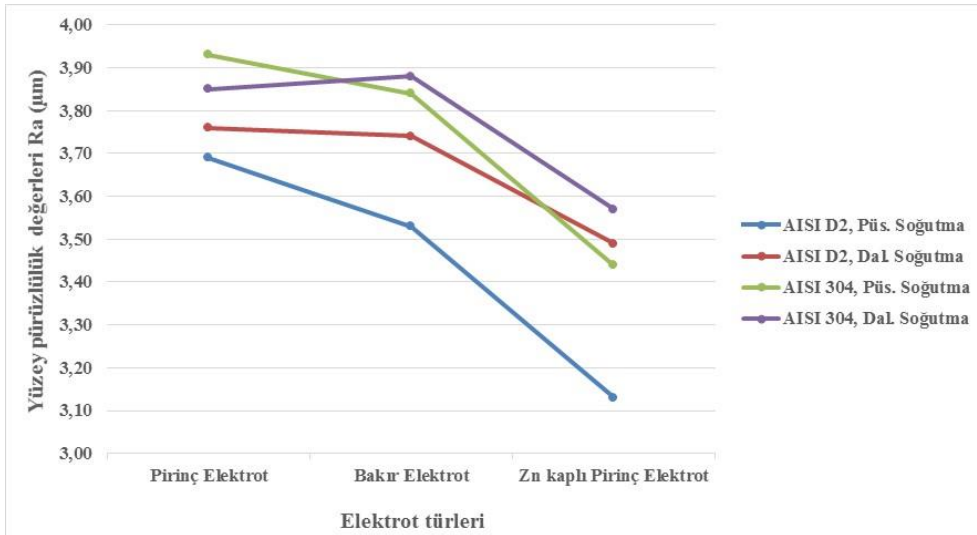
Çizelge 5. Deney numunelerinin işleme şartları

İş parçası malzemesi	Soğutma yöntemi	Tel elektrot
AISI 304	Püskürtmeli Soğutma	Pirinç
AISI 304	Püskürtmeli Soğutma	Bakır
AISI 304	Püskürtmeli Soğutma	Zn Kaplı Pirinç
AISI 304	Daldırılmış Soğutma	Pirinç
AISI 304	Daldırılmış Soğutma	Bakır
AISI 304	Daldırılmış Soğutma	Zn Kaplı Pirinç
AISI D2	Püskürtmeli Soğutma	Pirinç
AISI D2	Püskürtmeli Soğutma	Bakır
AISI D2	Püskürtmeli Soğutma	Zn Kaplı Pirinç
AISI D2	Daldırılmış Soğutma	Pirinç
AISI D2	Daldırılmış Soğutma	Bakır
AISI D2	Daldırılmış Soğutma	Zn Kaplı Pirinç

3. Bulgular

Farklı tip elektrot ve soğutma yöntemine bağlı olarak, AISI 304 ve AISI D2 malzemelerinin işlenmesi sonrası elde edilen yüzey pürüzlülük sonuçları Şekil 1-3 te verilmiştir. Elde edilen sonuçlar farklı tel elektrotlara, iş parçası malzemesine ve soğutma yöntemine bağlı olarak değerlendirilmiştir. Farklı tip elektrotlarla işlenen parçalarda ölçülen yüzey pürüzlülük değerleri Şekil 1'de gösterilmiştir. Şekil 1'deki grafik incelediğinde pirinç, bakır ve Zn kaplı pirinç tel elektrotlar birbirleriyle karşılaştırıldığında en iyi yüzey pürüzlülük sonuçları Zn kaplı tel elektrotla en kötü yüzey pürüzlülük sonuçları ise kaplamasız pirinç tel elektrotla kesim yapıldığında elde edilmiştir. Kaplamasız pirinç tel elektrot ile işlemede elde edilen kötü yüzey pürüzlülüğü iş parçası üzerinde düzgün olmayan termal yüklerden kaynaklanmaktadır. Düzensiz termal yükler, düzensiz kıvılcımdan dolayı oluşur. Uygun olmayan düzensiz kıvılcımlar işlenmiş yüzeye daha fazla zarar veren ark oluşumuna neden olabilir. Bu

sebeplerden dolayı kaplamasız tel ile kesmede oluşan yüzey pürüzlülüğü kötüleşmektedir.(Kuriakose and Shunmugam 2004). AISI 304 ve AISI D2 malzemeleri çinko kaplı tel elektrotla işlendiğinde elde edilen düşük yüzey pürüzlülük değerlerinin bulunması, pirinç telin çinko kaplı olmasına bağlı olarak daha yüksek çekme gerilmesine sahip olmasına atfedilmiştir. Çinko kaplı telin yüksek çekme gerilmesinden dolayı yüksek sıcaklıklarda mükemmel ısı dayanaklığı, titreşim ve gerilim altında ise telin düzgün bir şekilde sürdürebilirliğini devam etmesini sağlamaktadır (Kuriakose and Shunmugam 2004, Saha and Mondal 2016). Aynı zaman da homojen şekilde pirinç tel üzerine kaplanan çinkonun sağladığı boşalım karakteristiğinden dolayı daha iyi soğutma kabiliyeti görevi görmesine bağlı olarak da yüzey pürüzlülük değerlerinin düşmesini kolaylaştıracaktır (Manjaiah et al. 2015, Saha and Mondal 2016).



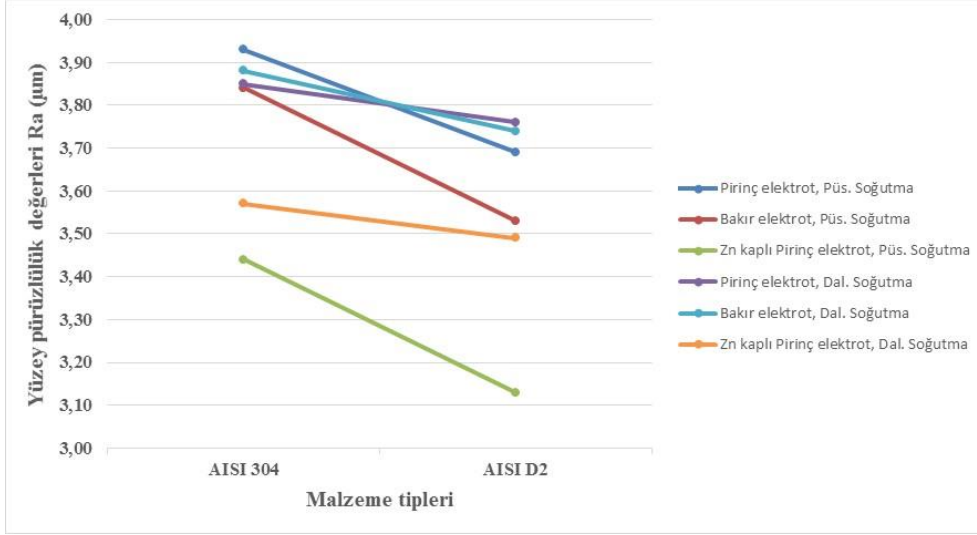
Şekil 1. Farklı tel elektrotlarla elde edilen yüzey pürüzlülük değerleri (Ra)

İş parçası tipine (AISI 304 ve AISI D2) göre elde edilen yüzey pürüzlülük değerleri Şekil 2'de verilmiştir. Şekil 2'deki grafik incelendiğinde en iyi yüzey pürüzlülük değerleri AISI D2 malzemesinden

elde edilirken en kötü yüzey pürüzlülük değerleri ise AISI 304 malzemesinden elde edilmiştir. Söz konusu bu durumun AISI D2 malzemesinin elektrik iletkenlik öz direncinin AISI 304 malzemesinin

elektrik özdirencinden daha düşük olmasından ötürü AISI D2 malzemesiyle elde edilen yüzey pürüzlülük sonuçları daha iyi çıkmıştır. Elektrik özdirencinin düşük olması [Çizelge 1-2] elektriği daha iyi iletmesine ve bunun sonucu olarak iş parçasının daha iyi kesilmesine katkıda bulunarak

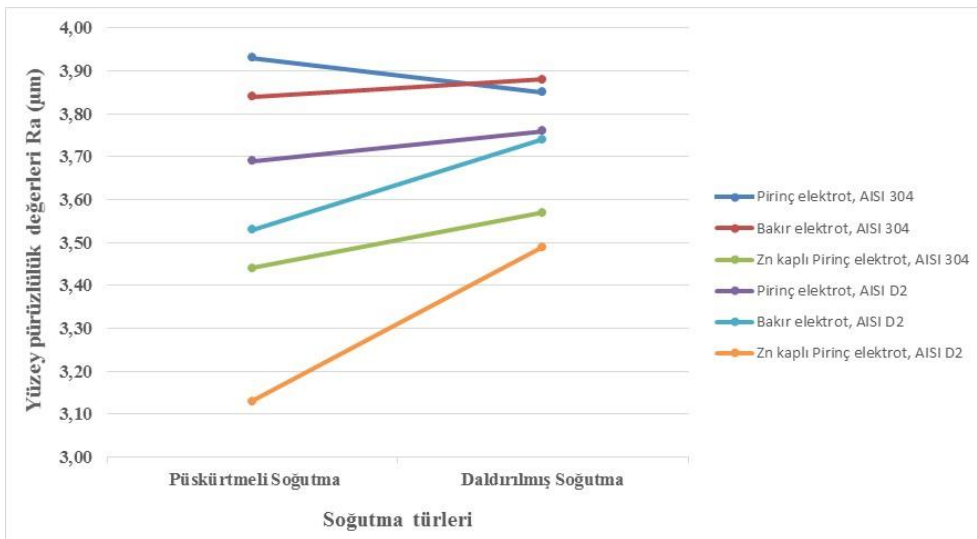
yüzey pürüzlülük değerlerinin daha düşük çıkmasına sebep olacaktır.



Şekil 2. Malzeme türüne bağlı olarak elde edilen yüzey pürüzlülük değerleri (Ra)

Soğutma yöntemine göre elde edilen yüzey pürüzlülük değerleri Şekil 3’de verilmiştir.Şekil 3’teki grafik incelediğinde en düşük yüzey pürüzlülük değerleri püskürtmeli soğutmada elde edilirken en kötü yüzey pürüzlülük değerleri ise daldırılmış soğutmada elde edilmiştir. En iyi yüzey pürüzlülük değerlerinin püskürtmeli soğutma yöntemiyle elde edilmesi gerek kesme bölgesindeki

sıcaklığın değişiminin minimize etmesine gerekse de o bölgede talaşın tahliyesini kolaylaştırmasına atfedilmiştir. Ayrıca kesme bölgesinde kıvılcımların sebep olduğu talaşların işlenmiş yüzeyde yapışma oranı daldırılmış soğutma göre daha az yapışacağından dolayı daha iyi yüzey pürüzlülük değerleri sebep olduğu düşünülmektedir.



Şekil 3. Farklı soğutma yöntemlerine bağlı olarak elde edilen yüzey pürüzlülük değerleri (Ra)

4. Sonuçlar

Yapılan bu deneysel çalışmada tel erozyon teknolojisinde işleme performansını değerlendirme en önemli kriterlerden biri olan yüzey pürüzlülüğü üzerine işleme şartlarının etkisi deneysel olarak araştırılmıştır. Deneyler sonucunda elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

- Zn kaplı tel elektrotlarla yapılan kesme işleminde en iyi yüzey pürüzlülüğü değerleri elde edilirken, en kötü yüzey pürüzlülük sonuçları ise kaplamasız pirinç tel elektrotlarla yapılan kesmede elde edilmiştir.

Kaynaklar

- Aliaşa, A., Abdullaha. B., Abbasa, N.M., 2012. WEDM: Influence of Machine Feed Rate In Machining Titanium Ti-6Al-4V Using Brass Wire and Constant Current (4a). *Procedia Engineering*, **41**, 1812 – 1817.
- Cabanes, I., Portillo, E., Marcos, M., Sánchez, J.A., 2008. An industrial application for on-line detection of instability and wire breakage in wire EDM. *Journal of Materials Processing Technology*, **195**, 101-109.
- Chinnadurai, T., Arungalai, V.S., 2015. Contemplating the Performance Measures of Wire cut EDM Based on Process Parameters for AISI 4140, *Materials Today: Proceedings*, **2**, 1067 – 1073.
- Dabade, U. A., Karidkar, S.S., 2016. Analysis of response variables in WEDM of Inconel 718 using Taguchi technique. *Procedia CIRP*, **41**, 886 – 891
- Fard, K.R., Afza R.A., Teimouri, R., 2013. Experimental investigation, intelligent modeling and multi-characteristics optimization of dry WEDM process of Al-SiC metal matrix

- İş parçası malzemesine göre değerlendirildiğinde; elde edilen en iyi yüzey pürüzlülük değerleri AISI D2

malzemesinde en kötü yüzey pürüzlülük değerleri ise AISI 304 malzemesinde olduğu tespit edilmiştir.

- Farklı soğutma yöntemlerine bağlı olarak en düşük yüzey pürüzlülük değerleri püskürtmeli soğutmada elde edilirken en kötü yüzey pürüzlülük değerleri ise daldırılmış soğutmayla işlemede görülmüştür.
- Tel elektrot kaplamanın, soğutma yönteminin ve iş parçası malzemesinin fiziksel özelliğinin yüzey pürüzlülüğü üzerinde etkili olduğu tespit edilmiştir.

composite. *Journal of Manufacturing Processes*, **15**, 483–494.

- Herreroa, A., Azcaratea, S., Reesb, A., Gehringerc, A., Schothc, A., Sanchezd, J.A., 2008. Influence of Force Components on Thin Wire EDM. *4th International Conference on Multi-Material Micro Manufacture*, Cardiff, UK.
- Hewidy, M.S., El-Taweel, T.A., El-Safy, M.F., 2005. Modelling the machining parameters of wire electrical discharge machining of Inconel 601 using RSM. *Journal of Materials Processing Technology*, **169**, 328–336.
- Huang, J.T., Liao, Y.S., Hsue, W.J., 1999. Determination of finish-cutting operation number and machining-parameters setting in wire electrical discharge machining. *Journal of Materials Processing Technology*, **87**, 69–81.
- Kuriakose, S., Shunmugam, M.S., 2004. Characteristics of wire-electro discharge machined Ti6Al4V surface. *Materials Letters*, **58**, 2231– 2237.
- Kuriakose, S., Shunmugam, M.S., 2005. Multi-objective optimization of wire-electro discharge machining process by Non-Dominated Sorting

- Genetic Algorithm. *Journal of Materials Processing Technology*, **170**, 133–141.
- Liao, Y. S., Huang, J.T., Su, H.C., 1997. A study on the machining-parameters optimization of wire electrical discharge machining. *Journal of Materials Processing Technology*, **71**, 487-493.
- Lin, C. T., Chung I.F., Huang S.Y., 2001. Improvement of machining accuracy by fuzzy logic at corner parts for wire-EDM. *Fuzzy Sets and Systems*, **122**, 499–511.
- Liu, J.F., Li, L., Guoa, Y.B., 2014. Surface integrity evolution from main cut to finish trim cut in W-EDM of shape memory alloy. *Procedia CIRP*, **13**, 137 – 142.
- Manjaiah, M., Narendranath, S., Basavarajappa, S., Gaitonde, V.N., 2015. Effect of electrode material in wire electro discharge machining characteristics of $Ti_{50}Ni_{50-x}Cu_x$ shape memory alloy. *Precision Engineering*, **41**, 68–77.
- Newton, T.R., Melkote, S.N., Watkins, T.R., Trejo, R.M., Reister, L., 2009. Investigation of the effect of process parameters on the formation and characteristics of recast layer in wire-EDM of Inconel 718. *Materials Science and Engineering A*, **513–514**, 208–215
- Rozenek, M., Kozak, J., Dałbrowski, L., èubkowski K., 2001. Electrical discharge machining characteristics of metal matrix composites. *Journal of Materials Processing Technology*, **109**, 367-370.
- Saha, A., Mondal S.C., 2016. Multi-objective optimization in WEDM process of nanostructured hardfacing materials through hybrid techniques. *Measurement*, **94**, 46–59.
- Sanchez, J.A., Rodil, J.L., Herrero, A., Lopez de Lacalle, L.N., Lamikiz, A., 2007. On the influence of cutting speed limitation on the accuracy of wire-EDM corner-cutting. *Journal of Materials Processing Technology*, **182**, 574–579.
- Sharma, P., Chakradhar, D., Narendranath, S., 2015. Evaluation of WEDM performance characteristics of Inconel 706 for turbine disk application, *Materials and Design*, **88**, 558–566.
- Sharma, P., Chakradhar, D., Narendranath, S., 2016. Effect of wire diameter on surface integrity of wire electrical discharge machined Inconel 706 for gas turbine application. *Journal of Manufacturing Processes*, **24**, 170–178.
- Soundararajan, R., Ramesh, A., Mohanraj, N., Parthasarathi N., 2016. An investigation of material removal rate and surface roughness of squeeze casted A413 alloy on WEDM by multi response optimization using RSM. *Journal of Alloys and Compounds*, **685**, 533-545.
- Zhang, C., 2014. Effect of wire electrical discharge machining (WEDM) parameters on surface integrity of nanocomposite ceramics. *Ceramics International*, **40**, 9657–9662.