

Dövme ve Eklemeli İmalat Yöntemiyle Üretilmiş Inconel 625 Alaşımların Termal Yöntemle Hızlı Delinmesinde Elektrot Aşınmasının İncelenmesi

Investigation of Electrode Wear in Ultra Fast Thermal Drilling of Wrought and Additively Manufactured Inconel 625 Alloys

Ferhat CERİTBİNMEZ¹, Ali GÜNEN², Uğur GÜROL^{3,4} ve Gurel ÇAM⁵

¹ Candy Hoover Group Srl, Eskişehir, Türkiye

² Iskenderun Technical University, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Department of Metallurgy and Materials Engineering, 31200 Iskenderun-Hatay, Türkiye

³ Istanbul Gedik University, Faculty of Engineering, Department of Metallurgical & Materials Engineering, Istanbul, Türkiye

⁴ Gedik Welding Company, Research and Development Center, Istanbul, Türkiye

⁵ Iskenderun Technical University, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Department of Mechanical Engineering, 31200 Iskenderun-Hatay, Türkiye

Öz

Inconel grubu alaşımlar üretildikleri 1950'li yıllardan beri havacılık, uzay, nükleer, biyomedikal endüstrisi gibi ileri mühendislik uygulamalarında sıklıkla tercih edilmektedir. Bu alaşımların daha maliyet etkenli bir yöntem olan eklemeli imalat yöntemiyle üretilebilirliği son 20 yılda yoğun olarak çalışılmaktadır. Ancak, süper alaşımlar işlenebilirliği zor malzemeler grubunda olup, iletkenlikleri zayıf olduğundan bu alaşımların delinmesinde kullanılan elektrotlarda ciddi hasarlar meydana gelmektedir. Dahası, eklemeli imalat yöntemleriyle üretilen bu alaşımların delinebilirliğinde kullanılan elektrotlardaki aşınmayı inceleyen sınırlı sayıda çalışma vardır. Bu amaçla bu çalışmada, dövme ve eklemeli imalat tekniği ile üretilmiş Inconel 625 alaşımların, EDM ile hızlı delik delme yöntemi kullanılarak 3 mm çapında pirinç elektrotlarla delinmesi neticesinde aşınan elektrotlarda oluşan aşınma miktarları incelenmiştir. Elektrot aşınması; iş parçası üzerinden ölçülen delik çapları ve kerf açıları dikkate alınarak analitik olarak ve deneylerde aşınan elektrotların hassas terazilerle tartılması ile fiziksel olarak tespit edilmiştir. Daha tok ve kararlı bir yapıda olan dövme Inconel malzemeyi işleyen elektrodun eklemeli imalat Inconel alaşımı işleyen elektroda göre % 108,33 daha fazla aşındığı tespit edilmiştir. Buna ilaveten, dövme Inconel iş malzemesinde elektrot aşınmasından kaynaklı kerf açısının eklemeli imalat Inconel malzemeye göre % 80,06 daha fazla olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Inconel 625, Tel-ark eklemeli imalat, Hızlı delik delme, EDM, Elektrot aşınması, Kerf açısı

Abstract

Inconel group alloys have been frequently preferred in advanced engineering applications such as aviation, space, nuclear and biomedical industries since the 1950s. The production of these alloys by the additive manufacturing method, which is a more cost-effective method, has been studied intensively in the last 20 years. However, superalloys are in the group of materials that are difficult to machine, and since their conductivity is weak serious damage occurs to the electrodes used in the drilling of these alloys. Moreover, there are a limited number of studies examining the wear of the electrodes used in the drillability of these alloys produced by additive manufacturing methods. For this purpose, the amount of wear on the electrodes as a result of drilling of wrought and additively manufactured Inconel 625 alloys by EDM fast drilling method using 3 mm diameter brass electrodes was investigated in this study. Electrode wear was determined analytically by considering the hole diameters and kerf angles measured on the workpiece, and physically by weighing the electrodes worn in the experiments with precision scales. It has been determined that the electrode that processed the wrought Inconel material, which has a tougher and more stable structure, wore 108.33% more than the electrode that drilled the additive-manufactured Inconel alloy. In addition, it was observed that the kerf angle due to electrode wear in the wrought Inconel material was 80.06% higher than that in the additive-manufactured Inconel alloy.

Keywords: Inconel 625, WAAM, Ultra fast drilling, EDM, Electrode wear, Kerf angle

I. GİRİŞ

Süper alaşımlar; 1000 °C'ye varan sıcaklıklara kadar yüksek yüzey kararlılığı, korozyon direnci ve mekanik mukavemetlerini koruyan bir alaşım türüdür. Bu alaşımlar geleneksel çelikler ve paslanmaz çeliklere göre daha yüksek oranda nikel, kobalt ve krom içerikleri ile oluşturulurlar. Ayrıca içeriklerinde az miktarda molibden, tungsten, niyobyum vb. refrakter elementleri içerirler [1]. Süper alaşımların çıkış serüveni düşünüldüğünde bu alaşımların paslanmaz çeliklerin oda sıcaklığındaki korozyon, oksidasyon ve mukavemet değerlerini yüksek sıcaklık uygulamalarında gösterememesinden çıktığı görülmüştür. Süper alaşımların geliştirilmesi ve literatüre kazandırılması 1950-1970 yılları arasında

2010'lu yıllara kadar süper alaşımların üretimi döküm, dövme veya toz metalurjisi yöntemlerinden biri ile üretilirdi. Bu yöntemlerin birbirlerine göre üstünlükleri vardı. Şöyle ki döküm yöntemi seri üretim için avantajlı bir üretim prosesi olmasına karşın döküm işlemindeki katılaşma çoğu zaman segregasyon ile sonuçlanır [3,4]. Bu durum mekanik özellikleri ve korozyon direncini olumsuz etkiler. Dövme süper alaşımların üretimi genellikle eritme, döküm, dövme, ısıl işlem, işleme ve tahratsız muayene gerektirdiğinden gibi çoklu üretim süreçleri bu alaşımların cost-effective bir şekilde üretilmemesine neden olmaktadır [4]. Geleneksel döküm ve işlenmiş Ni bazlı süper alaşımlarla karşılaştırıldığında PM Ni bazlı süper alaşımlar, katılaşma ayrışmasını etkili bir şekilde ortadan kaldıracak ve böylece genel mekanik özellikleri daha da iyileştirmek için alaşım seviyelerinde artışlara izin verebilir ancak tozların mekanik alaşımlandırılması, preslenmesi, sinterlenmesi, malzeme muayenesi gibi çoklu üretim süreçlerinin yanında boyut ve karmaşık geometri sınırlamalarını içermektedir [5].

Bu üç yöntemlerdeki sınırlamalar bilim insanlarını ve endüstriyel çevreyi süper alaşımların eklemeli imalat yöntemiyle üretilebilirliği üzerine çalışmaya yönlendirmiştir. 2000'li yıllara doğru Alman EOS firmasının direkt lazer sinterleme makinesini üretmesi metal ve alaşımlarının da eklemeli imalat yöntemi ile üretilebilirliklerini başlatmıştır [6]. Eklemeli imalat yönteminde üretilecek model, özel yazılımlarla katmanlara ayrıştırıldıktan sonra üç boyutlu yazıcı yardımıyla katman katman bir parçaya dönüştürülmektedir. Eklemeli üretim sayesinde, tasarımda oldukça kolaylık sağlanmakta ve üretimi oldukça zor olan parçalar kısa sürede rahatlıkla üretilmektedir [7,8]. Ancak, döküm, dövme ve toz metalurjisi yöntemlerde olduğu gibi eklemeli imalat yönteminde sınırlamaları vardır. Bunların en önemlileri üretilen parçalarda gözlemlenen mikroyapısal heterojenlikler ve mekanik özelliklerin tekrarlanabilirliğinin zorluğudur [7]. Eklemeli imalat yöntemleriyle günümüzde polimer malzemeler, alüminyum alaşımları, çelikler ve süper alaşımların üretildiği birçok çalışmada bildirilmiştir. Havacılık,

dayanmaktadır. Süper alaşımlar ilk olarak endüstride gaz türbinlerinde kullanılmak amacıyla geliştirilmiş olsa da günümüzde bu alaşımlar uzay ve havacılık endüstrisinde, nükleer endüstri, kimya endüstrisi, fırın parçalarında, korozif etkili kimyasalların muhafaza ve taşınmasında kullanılan potalarda ve petrol rafineri tesisleri gibi birçok endüstriyel uygulamada kullanım alanı bulunmaktadır [2]. Özellikle süper alaşımların havacılık endüstrisinde uçak ve endüstriyel gaz türbinlerinde civatalar, şaftlar, sabit kanatçıklar ve yanma odalarında kullanımı bulunmaktadır. Çevirimli motorlarda turbo şarjlar, egzoz valfleri, sıcak bujiler, valf-yatağı saplamalarında kullanılmaktadır [2].

uzay, nükleer, medikal, ısıl işlem ekipmanları gibi ileri mühendislik uygulamalarındaki kullanımlarından dolayı süper alaşımların eklemeli imalat yöntemiyle üretilebilirlikleri özel bir yere sahiptir. Süper alaşımlar içeriğindeki ana alaşım elementine bağlı olarak demir esaslı süper alaşımlar, kobalt esaslı süper alaşımlar ve Ni-esaslı süper alaşımlar olarak 3'e ayrılır [8]. Demir esaslı süper alaşımlara göre daha yüksek sıcaklık dayanımlarına sahip olmakla birlikte kobalt esaslı süper alaşımlara göre daha cost-effective olması dolayısıyla Ni esaslı süper alaşımlar diğer iki alaşıma göre daha yaygındır [9-16]. Ni esaslı süper alaşımların kullanım alanlarının başında havacılık endüstrisidir. Gelişmiş uçakların ağırlığının %40'ından fazlasının bu alaşımlardan oluştuğu bildirilmiştir [17]. Bu alaşımların uçaklardaki kullanım yerleri düşünüldüğünde havacılık motoru bileşenleri, gaz türbini sıcak uç bileşenleri gibi uçakların başlıca yapısal parçalarıdır [18,19]. Ni esaslı süper alaşımlar içerisinde ise Inconel 625 zorlu yüksek sıcaklık dayanımları sebebiyle havacılık ve uzay endüstrisinde kullanılan ve ticari olarak temin edilebilen Ni bazlı süper alaşımların en yaygın olanıdır [20]. Bu alaşımların uçaklardaki kullanım yerleri düşünüldüğünde bu alaşımların birleştirme işlemleri için delinmesi, perçin yuvalarının açılması vb. birçok ikincil işlem gerektirdiği anlaşılmaktadır. Yapılan bu işlemler sonrasında malzeme yüzey kalitesinin iyi olması gerekmektedir [21] Karataş ve Gökkaya [22] küçük uçaklarda yaklaşık yüz bin, büyük uçaklarda ise neredeyse bir milyondan fazla montaj deliği bulunduğunu bildirmişlerdir. Ancak, Ni esaslı süper alaşımlar "delinmesi zor" malzemeler (Süper alaşımlar, Zr alaşımları ve WC alaşımları) grubu içerisinde yer alır [23-25].

Bu durum süper alaşımların sahip olduğu çok zayıf termal iletkenlikleri dolayısıyla sürtünmeden kaynaklı ısıyı üzerlerinden zor atmalarının bir sonucudur. Bu durum işleme takımları üzerinde ciddi hasarlara neden olur. Bu delinmesi zor malzeme gruplarının delinmesi için tel erozyon dalma EDM (Electrical Discharge Machining- elektrik deşarjlı işleme) prosesi gibi geleneksel olmayan işleme yöntemleri kullanılır, çünkü bunlar, sertlik ve erime sıcaklığından bağımsız olarak

sert alaşımları yüksek doğruluk ve mükemmel finisajla delebirlirler [26-28]. Literatür incelendiğinde döküm ve dövme yöntemiyle üretilen süper alaşımların bu yöntemlerle delinebilirliği üzerinde çalışmalar olmakla beraber eklemeli imalat yöntemiyle üretilen numunelerin delinebilirliği üzerine literatürde sınırlı sayıda çalışmanın olduğu (ya da olmadığı) görülmüştür. Literatürde yapılan çalışmalardan bazıları:

Choudhary ve arkadaşları, Inconel 600 süper alaşımının EDM yönteminde işlenmesinde işleme parametrelerinin elektrot aşınma oranı (TWR - Tool Wear Rate) için optimizasyonu Taguchi yaklaşımı ile çalışmışlardır. Analizlerde değişken parametreler olarak ark süresi (T_{on} - pulse-on-time), akım (I_p - peak current), and voltaj (V_g - gap voltage) seçerek elektrot olarak tungsten karbür (WC), dielektrik sıvı olarak EDM sıvısı kullanmışlardır. Akımın (I_p) artmasıyla TWR'in doğrusal olarak arttığını, voltajın (V_g) artmasıyla önce azaldığını daha sonra tekrar artış eğilimine girdiğini, ark süresinin (T_{on}) artışıyla önce arttığını daha sonra azalış eğilime girdiğini rapor etmişlerdir. Optimum TWR ($0.551 \text{ mm}^3/\text{min}$) için I_p (30 A), V_g (94 V) ve T_{on} (150 s) çalışma parametrelerini önermişlerdir [29]. Sahoo ve arkadaşları [30], Inconel 625 alaşımının dalma erozyon EDM yönteminde işlenmesinde kullanılan işleme parametrelerinin Taguchi yaklaşımı ile optimizasyonu üzerine çalışmalar yapmıştır. Giriş parametreleri olarak ark süresi, dielektrik sıvı püskürtme basıncı ve akım seçilerek çıktı parametreleri olarak talaş kaldırma oranı (MRR - material removal rate) ve elektrot aşınma oranı (TWR) analiz edilmiştir. Inconel 625'in EDM ile işlemede en çok akım (etkisi %78 civarındadır) ve ark süresi (etkisi %18) parametrelerinden etkilendiğini vurgulayarak; maksimum MRR ve minimum TWR için ark süresi 110 μs , akım 5 A ve dielektrik sıvı püskürtme basıncı 7.5 psi değerlerini önermişlerdir [30]. Singh and Singh, korozyona karşı oldukça dirençli malzeme türü olan Inconel 600 nikel - krom süper alaşımının oldukça kırılğan olmasından dolayı konvansiyonel yöntemlerle işlenmesinin uygun olmadığını bildirmiştir. Bu malzemeleri EDM yönteminde 14 mm çapında bakır, pirinç ve bakır-tungsten elektrotlarla işleyerek talaş kaldırma oranı (MRR), elektrot aşınma oranı (EWR) ve yüzey pürüzlülüğü (SR) değerlerini Anova ile analiz etmişlerdir. EWR üzerine en çok etki eden parametrelerin elektrot cinsi ve akım olduğunu; optimal EWR için (bakır-tungsten), akım 9 A, ark süresi 120 μs ve voltaj 40V değerlerinin kullanılmasını önermişlerdir. Bakır-tungsten elektrodun bakır ve pirinç elektroda göre daha düşük EWR sergilediğini vurgulamışlardır [31].

Urtekin ve arkadaşları, Ti6Al4V alaşımının elektro erozyon ile işlenmesinde elektrolitik-bakır (E-Cu) ve bakır-berilyum (Cu-Be) takım elektrotlarının performansının karşılaştırılması üzerine çalışma yapmıştır. Cu-Be elektrotlarla işlemede MRR'de bir

artış, TWR'de ve relatif aşınmada ($RW = TWR / MRR$) bir azalma gözlemlemişlerdir. CuBe alaşımının yüksek hammadde maliyeti, bu elektrotların endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılmasında önemli bir dezavantaj olduğunu bildirmişlerdir. Düşük ve yüksek akım ayarlarında E-Cu'nun hammadde maliyetinin düşük olduğunu bu durumun onu daha avantajlı hale getirdiğini rapor etmişlerdir. Cu-Be alaşımı, daha yüksek MRR ve daha düşük relatif aşınma (RW - relative wear) değerleri göz önüne alındığında, E-Cu'dan daha iyi performans gösteren bir elektrot malzemesi olarak kabul edilmiştir [32]. Opoz ve arkadaşları [33], hidroksiapatit (HA) tozu katkılı elektro erozyon ile işlenen Ti6Al4V yüzeylerini incelemiştir. Deiyonize sudaki farklı HA konsantrasyonları EEI sırasında deneysel bir değişken olarak test etmişler. Hidroksiapatit tozu katkılı EEI'nin yüzeylerinin diğer yüzeylere kıyasla daha yüksek hidrofilik özellik sergilediğini bildirmişlerdir. HA tozu katkılı EEI'nin, titanyum alaşımları gibi biyomalzemelerin yüzey modifikasyonu için umut verici bir yöntem olduğunu vurgulamışlardır [33]. Yuvaraj ve arkadaşları ise, Inconel 625 malzemesinin EDM yönteminde işlenmesinde dielektrik sıvı içerisine titanium karbür nano tozlar ekleyerek kesim verimliliğinin arttığını bildirmişlerdir [34].

Literatür çalışmaları incelendiğinde EDM yönteminde Ni ve Ti gibi alaşımları içeren malzemelerin işlendiği, işleme parametrelerinin etkilerinin analiz edildiği, farklı katkı malzemelerin deiyonize sudaki katkılarının raporlandığı görülmüştür. Fakat dövme ve eklemeli imalat yöntemiyle üretilmiş Inconel 625 alaşımının EDM ile delinmesi ve kullanılan elektrotların aşınması konusunda literatürde büyük açık vardır. Bu sebeple bu çalışma akademik ve endüstriyel uygulamalar için önemli bir referans olma potansiyeli barındırmaktadır.

II. MATERYAL VE METOD

2.1. Dövme ve eklemeli imalat ile üretilmiş Inconel 625 test malzemeleri

Bu çalışmada, dövme ve eklemeli imalat yöntemiyle üretilen Inconel 625 malzemeler kullanılmıştır. Eklemeli imalat yöntemi olarak diğer yöntemlere nispeten daha büyük boyutların daha düşük maliyetlerle üretilmesine olanak sağlayan tel-ark eklemeli imalat (wire arc additive manufacturing - WAAM) yöntemi kullanılmıştır. WAAM numunelerinin üretiminde 1,2 mm çapında ER NiCrMo dolu tel kullanılmıştır. Kullanılan telin kimyasal bileşimi üretici firma tarafından % ağırlıkça 64,86 Ni, 21,15Cr, 8,67 Mo, 3,54Nb, 1,15 Fe ve arta kalan diğer katışıklar olarak belirtilmiştir. Biriktirme işlemi Gedik kaynak atölyesinde bulunan 6 eksenli OTC Daihen FD-V8L robotuna entegre su soğutmalı torçlu GeKa-Tec WB 500L makinesinde 150 A, 15.8 V, 50 cm/min hız ve 97,5% Ar + 2,5% CO2 koruyucu gazın 15 L/dk akış hızı parametreleri ile S304 çelik üzerine $350 \times 75 \times 12$ mm olacak şekilde parçalar üretilmiştir. Birçelik A.Ş'den çözeltiliye alama tavı yapılmış halde temin

edilen dövme Inconel 625 süper alaşımı ve WAAM Inconel 625 alaşımı malzemelerin kimyasal bileşimi Tablo 1’de verilmiştir.

Üretim sonrası yüksek yüzey pürüzlülüklerinin giderilmesi amacıyla numuneler freze tezgahında WEDM tezgahı kullanılarak 30x10x5 mm ölçülerine kesilmiştir. Daha sonra, Şekil 1’de gösterildiği gibi, hassas mengene aparatları kullanılarak EDM tezgahına bağlanmıştır.

2.2. EDM ile hızlı delik delme

Bu çalışmada her bir delik delme işleminde \varnothing 3 mm dış çap - \varnothing 1,5 mm iç çapı olan pirinç elektrot tüpler kullanılmıştır. Deneyler Oscarmax SD 400 ZNC PLUS 50 Amper gücünde hızlı delik delme EDM (Electric Discharge Machining) makinasında gerçekleştirilmiştir. Erozyon işlemi, Şekil 1’de gösterildiği gibi, elektrot ve iş parçası arasındaki talaşın tahliyesi için elektrot içerisinde ve spiral hortumlar ile elektrot dışından dielektrik sıvı (saf su) püskürtülerek dielektrik sıvı altında gerçekleştirilmiştir. Çalışma parametrelerinin seçiminde pirinç elektrot ve makina güvenli çalışma parametreleri dikkate alınarak 7A akım, 29 μ s ark süresi, 3 μ s bekleme süresi (Toff) ve 3V voltaj değerleri kullanılmıştır.

2.3. Kerf açısı ve EWR hesaplamaları

Termal yöntemler kullanılarak delinen deliklerin giriş

çapları ve çıkış çapları arasında elektrot aşınmasına bağlı olarak ölçüsel farklılıklar olur. Çünkü elektrodun işlem başlangıcındaki ölçüleri ile işlem sonundaki ölçüleri aynı değildir. EDM teknolojisinde elektrot formu iş parçası üzerinde boşaltılır. Elektrot uc kısımlarında kıvılcımlanma yoğun olduğu için aşınma o bölgede olur. İş parçası üzerinde elektrot aşınmasına bağlı olarak oluşan kerf açısı, Eşitlik 1’de verilen denklem yardımı ile hesaplanmaktadır. Bu eşitlikte belirtilen Hen elektrodun iş parçasına girişte açtığı delik giriş çapı, Hex ise elektrodun iş parçasından çıktığı anda oluşturduğu delik çıkış çapıdır. İş parçası kalınlığı olan t ise iş parçasının kalınlığıdır [35]. Delik giriş ve çıkış farklılıklarından kaynaklanan kerf açısı T ise Şekil 2’de gösterilmiştir.

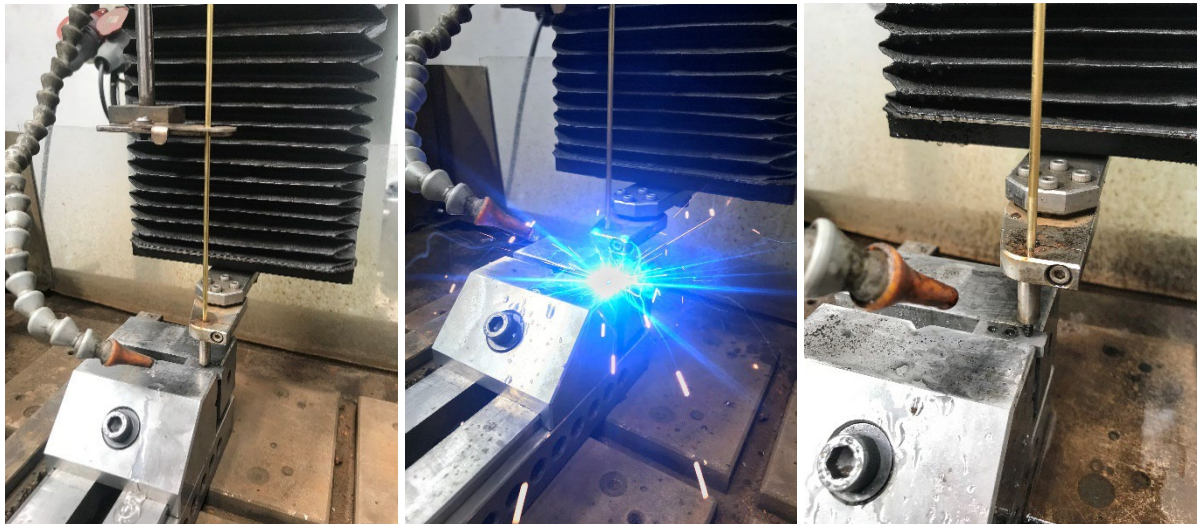
$$\text{Kerf Konik Açısı (T)} = \text{Arctan} (D_g - D_c / 2.t) \quad (1)$$

EDM işleminde kullanılan elektrotların işlem başlangıcındaki ağırlıkları ile işlem sonundaki ağırlıkları aynı değildir, çünkü aşınmalarından dolayı kütle kaybı yaşarlar. Bu kütle kaybıyla ortaya çıkan elektrot aşınma miktarı (EWR), Eşitlik 2 kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$\text{EWR (\%)} = (\text{İlk ağırlık} - \text{Son ağırlık} / \text{İlk ağırlık}) \cdot 100 \quad (2)$$

Tablo 1. Çalışmada kullanılan dövme ve WAAM Inconel 625 alaşımlarının ağırlıkça % kimyasal bileşimi

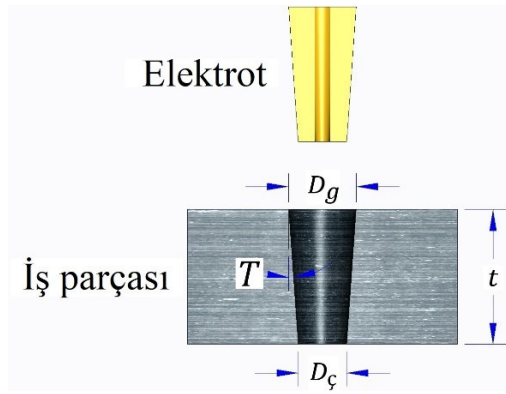
Malzeme	Ni	Cr	Fe	Nb	Mo	Ta	Diğer elementler
Dövme	61,30	22,91	1,92	3,35	9,94	0,11	0,47
WAAM	60,95	23,45	1,87	3,78	9,62	0,10	0,22



Şekil 1. EDM hızlı delik delme: (a) delme öncesi (b) delme anı ve (c) delme sonrası

III. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Yapılan tüm deneyler sonrası iş parçası üzerinde elde edilen delik giriş çıkış çapları ve bu çap farklılıklarından kaynaklı kerf ölçüleri Tablo 2’de verilmiştir. İş parçası üzerindeki delik çaplarının ölçümlerinde en az 3 farklı ölçüm yapılarak ortalama değerler yüksek hassasiyete sahip Mitutoyo kumpas kullanılarak tespit edilmiştir. Tüm deneylerde delik giriş çaplarının delik çıkış çaplarından daha büyük olduğu görülmüştür. Dövme malzemenin delinmesinde elektrot aşınması eklemeli imalat ile üretilmiş malzemenin delinmesine göre daha fazla olduğu için kerf açısı dövme alaşımın delinmesinde daha yüksek çıkmıştır.



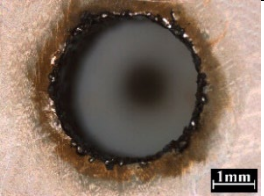
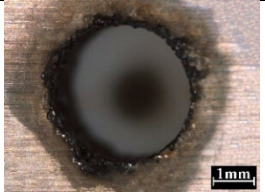
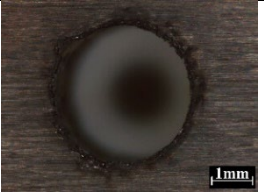
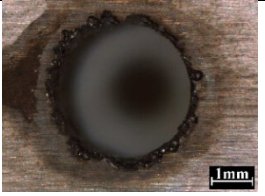
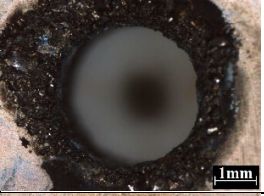
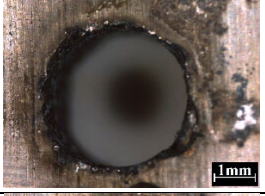
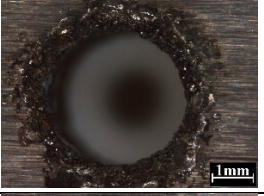
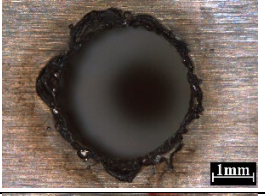
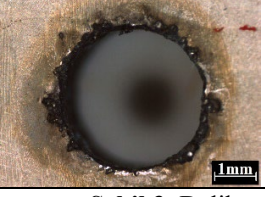
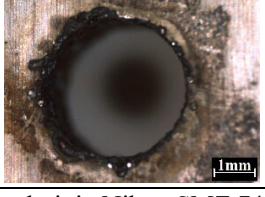
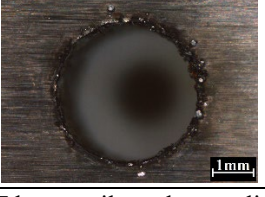
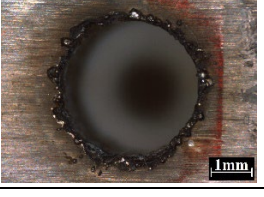
Şekil 2. Kerf konik açısı ölçümü

Delinen iş parçasının giriş ve çıkış bölgelerinin makro görüntüleri Nikon SMZ 745T mikroskop kullanılarak elde edilerek Şekil 3’te gösterilmiştir. Tüm delik giriş ve çıkış bölgelerinde yüksek ısı neticesinde ergimmiş ve tekrar katılaşmış malzeme kalıntıları görülmektedir.

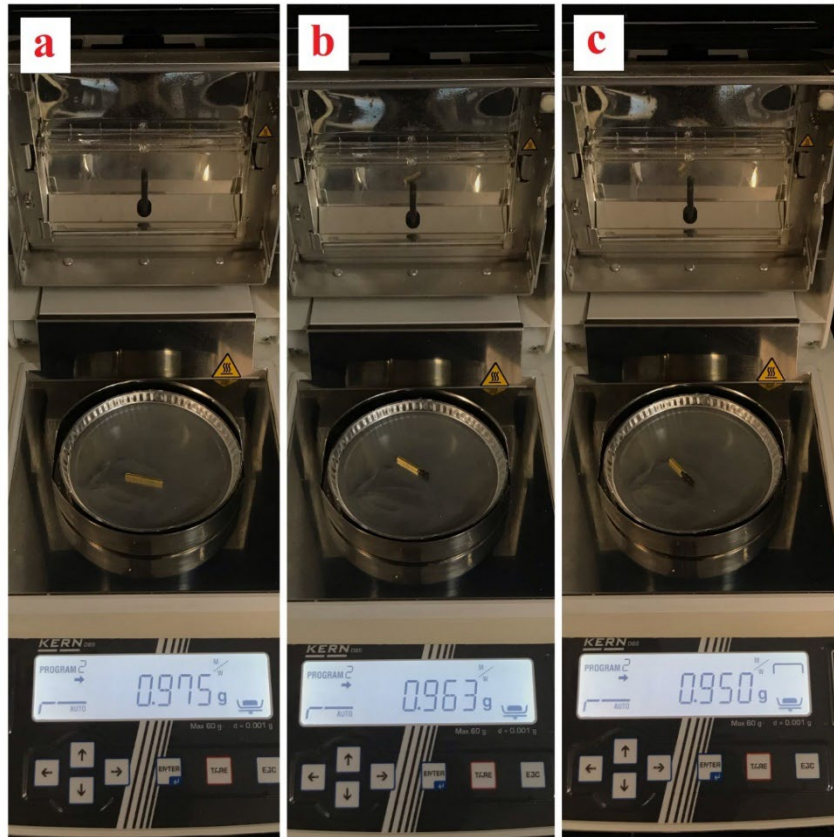
Deneylerde kullanılan tüm elektrotların işleme öncesi ve sonrası ağırlıkları 0,001 g hassasiyete sahip Kern DBS60-3 terazi ile tespit edilmiştir. Şekil 4’te elde edilen tartım verileri ve Eşitlik 2’deki eşitlik kullanılarak hesaplanan EWR değerleri incelendiğinde, eklemeli imalat ile üretilmiş Inconel 625 numunenin işlenmesinde EWR % 1,23 iken dövme Inconel 625 alaşımın işlenmesinde EWR % 2,56 olarak tespit edildiği görülmektedir. EDM işleminde elektrotlardan (anot) iş parçasına (katot) doğru yoğun kıvılcım atlamaları olur. Bu süreçte iş parçası üzerinde yüksek ergime ve buharlaşmadan ötürü parçalar kopar ortama püskürtülen dielektrik sıvı (saf su) yardımı ile bu partiküller aniden soğur ve katılarak ortamdan tahliye edilir. Bu süreçte elektrot uç kısımlarında da aşınma meydana gelir. Uç kısımları aşınan elektrodun formu iş parçası üzerinde boşaltıldığı için iş parçası üzerinde meydana gelen boşlukta da kerf koniklik açısı oluşur. Bu değerler Şekil 5’te gösterilmiştir. Eklemeli imalat ile üretilmiş ve dövme numunelerin kesimlerde kullanılan elektrotların uc ve yan kenar aşınmalarının makro analizleri Şekil.6’da gösterilmiştir.

Tablo 2. İş parçaları üzerinde ölçülen delik çapları ve kerf açıları

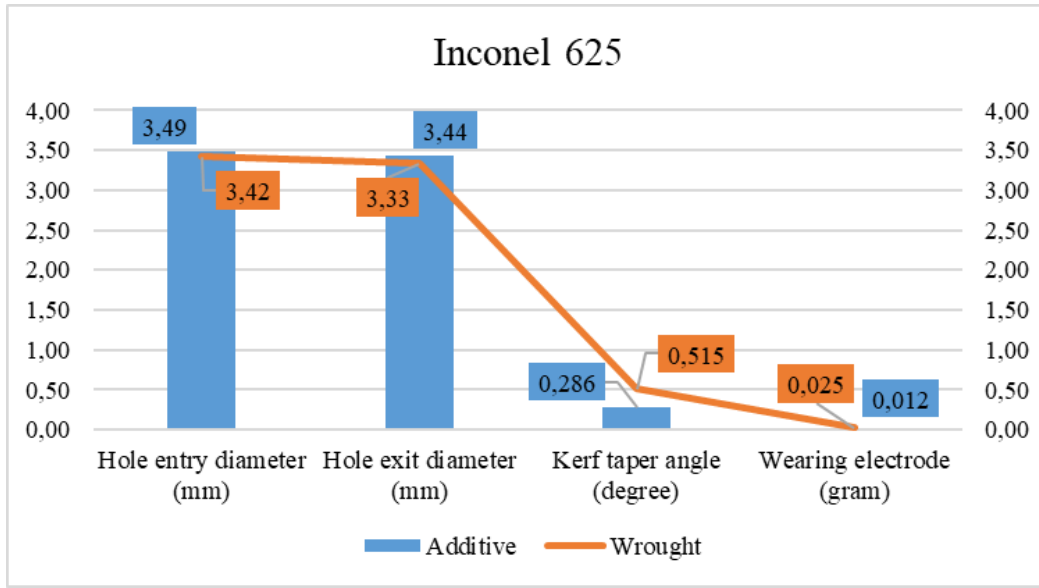
Inconel 625	Test Sayısı	Delik giriş çapı (mm)	Delik çıkış çapı (mm)	Kalınlık (mm)	Kerf (derece)
Eklemeli İmalat	1	3,48	3,44	5	0,229
	2	3,50	3,44	5	0,343
	3	3,48	3,44	5	0,229
	ortalama	3,49	3,44	5	0,286
Dövme	1	3,40	3,38	5	0,114
	2	3,44	3,30	5	0,802
	3	3,42	3,32	5	0,572
	ortalama	3,42	3,33	5	0,515

Test No	Eklemeli imalat ile üretilmiş Inconel 625		Dövme Inconel 625	
	Delik girişi	Delik çıkışı	Delik girişi	Delik çıkışı
1				
				
				

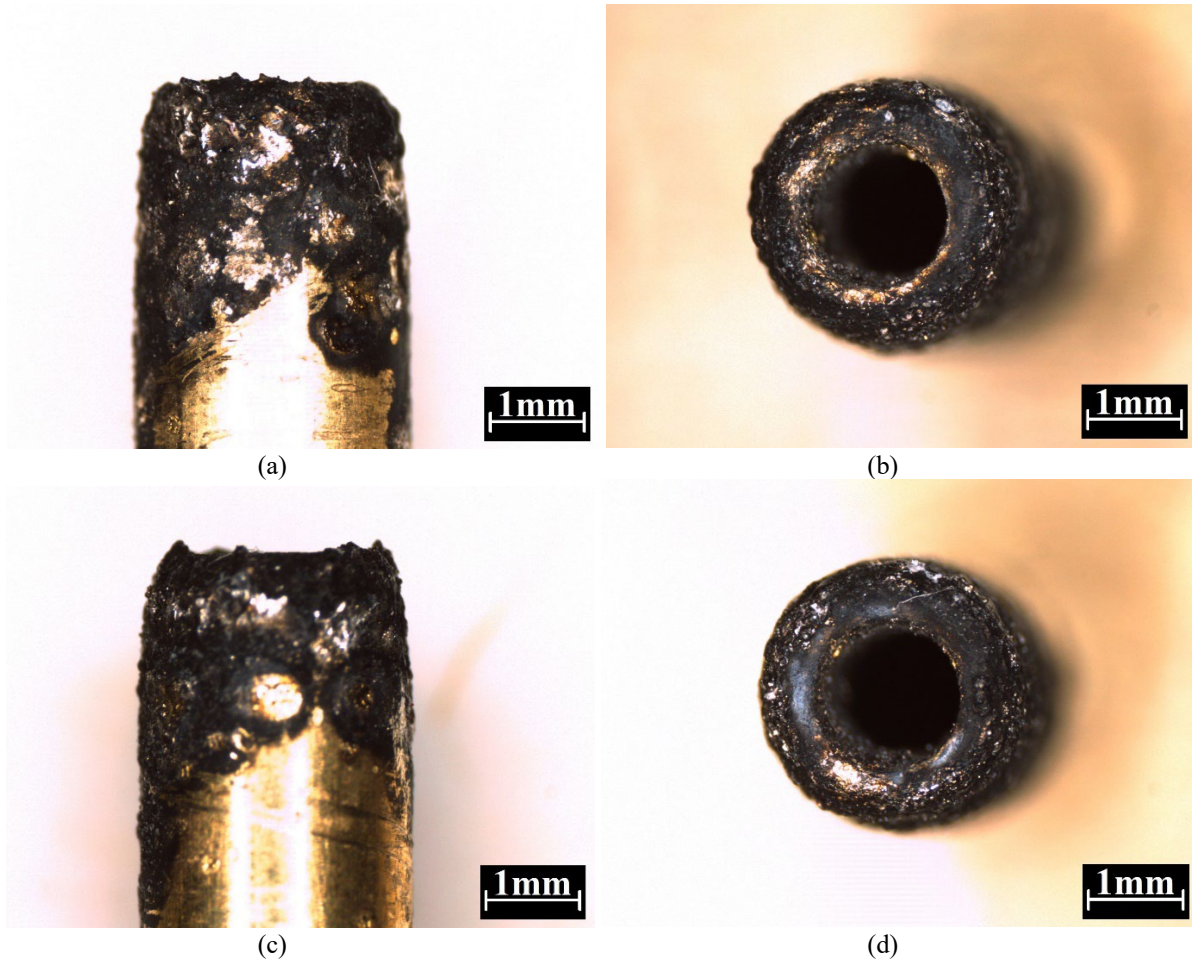
Şekil 3. Delik yüzeylerinin Nikon SMZ 745T kamera ile makro analizi



Şekil 4. Elektrot tartım işlemi (a) Pirinç elektrot (b) Eklemeli işleme ve (c) Dövme işleme



Şekil 5. Test sonuçlarının grafiksel gösterimi



Şekil 6. Pirinç elektrotların makro analizi: (a), (b) eklemeli imalatla üretilmiş numunenin delinmesi ve (c), (d) dövme numunenin delinmesi

Aşınan elektrotların SEM analizleri incelendiğinde işlem görmüş bölgelerinde, Şekil 7 (a) ve (b)'den görüleceği üzere, **çatlaklar**, **boşluklar**, **baloncuklar**, **kraterler** ve **kalıntılar**ın varlığı tespit edilmiştir.

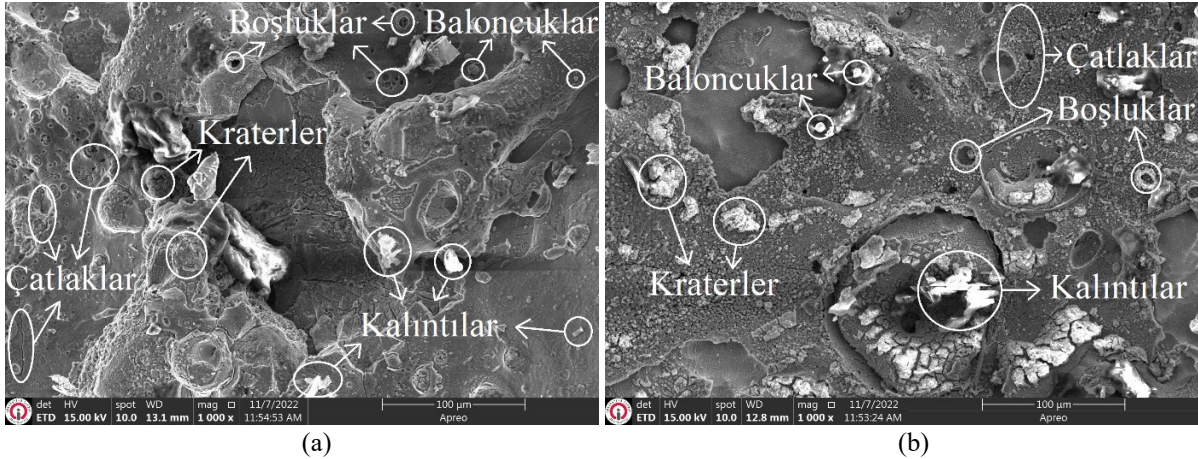
Yüksek sıcaklık ile ergiyen metalin katılaşması sırasında hapsolan gazlar baloncukları oluşturur. Katılaşma esnasında bu **baloncuklar (globules)** patlar ise boşlukları oluşturur. Yüzeyde oluşan bu baloncuk

ve boşluklar yüzey morfolojisine direkt olarak etki etmektedir [36]. Yüksek sıcaklıklarla ergiyen iş parçası ve elektrot kalıntılarının yüzeyde katılaşması esnasında dielektrik sıvının daha düşük sıcaklıklarda temas etmesi neticesinde çatlaklar meydana gelir. Aşınan iş parçası ve elektrot kalıntılarının işlenmiş yüzeylerden tamamen arındırılmaması neticesinde de kalıntılar gözlemlenir.

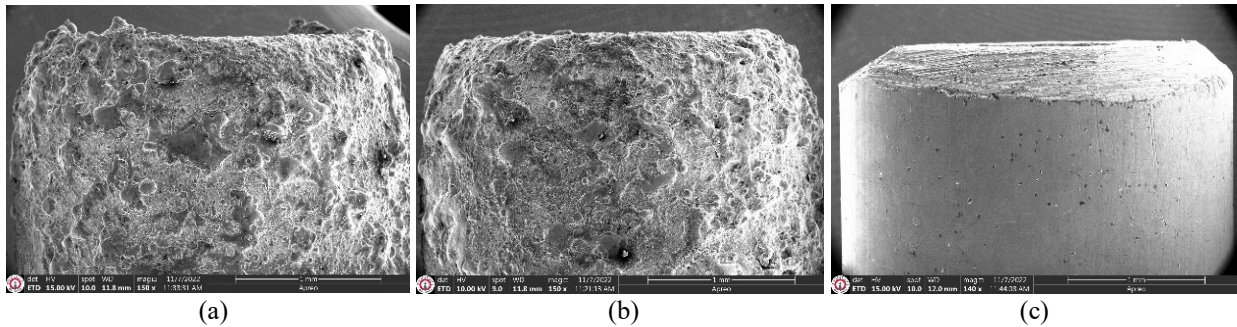
Deneysel olarak kullanılan işlem görmüş elektrotlar ile kullanılmamış elektrotların SEM görüntüleri Şekil 8’de verilmiştir. Şekil 8 (a) and (b)’de, elektrot yüzeylerinden de ısı ve ergime neticesinde parçalar kopmuş (aşındığı) bu sebeple yüzeylerinin pürüzlü bir yapıya sahip olduğu görülmektedir. İşlem görmemiş elektrot yüzeyinin daha pürüzsüz ve düzgün olduğu görülmüştür (Şekil 8 (c)). EDM işlemi esnasında iş parçasından kopan partiküllerinde elektrot üzerine yapışma ihtimali vardır ve bu durum elektrot aşınmasına etki edebilir.

EDM gibi termal yöntemlerle delik delme esnasında yüksek sıcaklıklar altında aşınan ve buharlaşan iş parçası ve elektrot malzeme kalıntılarının ortamdan tahliye edilmesi için kullanılan su bazlı dielektrik sıvıların kimyasal tepkimeler sonucu hidrojen ve oksijene dönüşmesiyle iş parçası ve elektrot üzerinde oksit tabakası oluştuğu bilinmektedir [37].

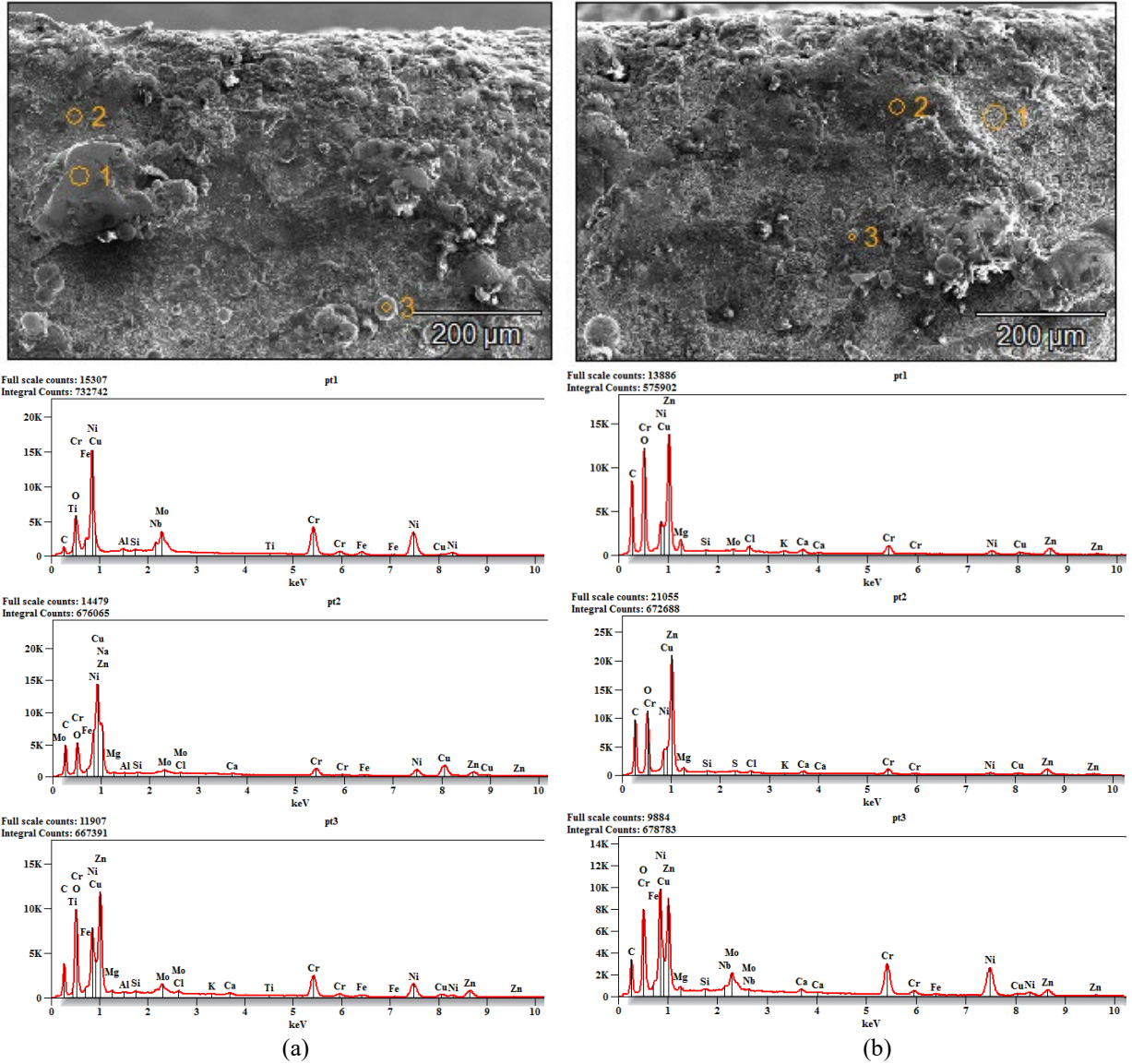
Şekil 9 (a) ve (b)’de görüldüğü üzere, her iki elektrot üzerinde aşınmış iş parçası kalıntılarını gösteren C, O, Mg, Si, S, Cl, K, Ca, Cr, Fe, Ni, Nb, Mo gibi iş parçası ve oksit kalıntıları ile Cu ve Zn gibi pirinç elektrot kalıntıları tespit edilmiştir. Dövme Inconel numuneyi işleyen elektrot üzerinde tespit edilen Cu ve Zn element kalıntılarının ağırlıkça oranının, eklemeli imalatla üretilmiş numuneyi işleyen elektrota göre % 1,37 daha fazla tespit edilmiştir. Bu durum EWR değerlerini ve hassas terazi ölçüm sonuçlarını destekler nitelikte olmuştur.



Şekil 7. Elektrot yüzeylerinin SEM analizi: (a) eklemeli imalatlı numunede delme işleminde ve (b) dövme numunede delme işleminde kullanılan elektrot



Şekil 8. Elektrot yüzeylerinin SEM analizi: (a) eklemeli imalatlı numunede, (b) dövme numunedeki delme ve (c) işlem görmemiş



Şekil 9. Elektrot yüzeylerinde gerçekleştirilen SEM ve EDS analizleri: (a) eklemeli imalatla üretilmiş numunedeki delme işlemi ve (b) dövme numunedeki delme işlemi

IV. SONUÇ

Bu çalışmada dövme ve eklemeli imalat yöntemiyle üretilmiş Inconel 625 alaşımların termal yöntemle hızlı delinmesinde karşılaşılan elektrot aşınması SEM ve EDS kullanılarak analiz edilmiştir. Ayrıca 0,01 mm hassasiyete sahip kumpaslarla yapılan analitik ve 0,001 gram hassasiyete sahip terazi kullanılarak elde edilen ölçüm sonuçlarına göre aşağıdaki bulgular raporlanmıştır;

- Deneylerde kullanılan elektrotların hassas tartımları neticesinde dövme Inconel malzemenin işlenmesinde kullanılan elektrodun 0,025 gr, eklemeli imalat ile üretilmiş Inconel malzemenin işlenmesinde kullanılan elektrodun ise 0,012 gr aşındığı ölçülerek; elektrot açısından dövme malzemeyi işleyen elektrodun eklemeli imalatla üretilmiş Inconel numuneyi işleyen elektroda göre

% 108,33 daha fazla aşındığı tespit edilmiştir.

- Dövme Inconel 625'in delinmesinde elektrot aşınması eklemeli imalatla üretilen Inconel numunelere göre arttığından dolayı daha küçük delik giriş ve çıkış çapları elde edilmiştir. Dövme Inconel numuneyi delen elektrodun işlem gören kısımlarının çap ölçüsünün eklemeli imalatla üretilmiş Inconel numuneyi delen elektrota göre daha düşük olduğu yani yanıl aşınmanın arttığı tespit edilmiştir. Dövme Inconel iş malzemesinde elektrot aşınmasından kaynaklı kerf açısı eklemeli imalat Inconel malzemeye göre % 80,06 daha fazla olduğu tespit edilmiştir.
- Yapılan tüm deneysel çalışmalarda iş parçası delik giriş ve çıkış bölgelerinde ergimiş metal kalıntıları (debris) tespit edilmiştir.
- Eklemeli imalatla üretilmiş Inconel 625 numunenin işlenmesinde EWR % 1,23 iken,

dövme Inconel 625 işlemede % 2,56 olarak tespit edilmiştir.

- SEM ve EDS analizlerine göre dövme Inconel numuneyi işleyen elektrot üzerinde tespit edilen Cu ve Zn element kalıntılarının ağırlıkça oranı eklemeli imalat ile üretilmiş Inconel numuneyi işleyen elektrotta göre % 1,37 daha fazla tespit edilmiştir.

TEŞEKKÜR

Tel-ark eklemeli imalat (WAAM) ile Inconel 625 parça üretimi sırasında teknik destekleri için İstanbul-Türkiye'deki Gedik Kaynak Ar-Ge Merkezi'ne teşekkürü borç biliriz. Ayrıca, Oscarmax SD400 EDM'de gerçekleştirilen delme işlemlerinde teknik destekleri için Haier Europe, Candy-Hoover, Eskişehir-Türkiye Kalıp Departmanı personeline ve mikroskop görüntülerinin elde edilmesindeki desteği için MEGEM (Mesleki Eğitim ve Geliştirme Merkezi), Eskişehir-Türkiye, Mekanik Test Laboratuvarı Teknik Müdürü Yasin YİĞİT'e ve Teknik Öğretmen Yasin ÖZEN'e teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

- [1] Tin, S., Hardy, M., Clews, J., Cormier, J., Feng, Q., Marcin, J., ... & Suzuki, A., Superalloys (2020).
- [2] Reed, R.C., The superalloys: fundamentals and applications. Cambridge University Press (2008).
- [3] Sjöberg, G., Casting superalloys for structural applications. *In 7th international symposium on superalloy*, vol. 718, pp. 117-130, (2010).
- [4] Yang, S.F., Yang, S. L., Qu, J. L., Du, J. H., Gu, Y., Zhao, P., & Wang, N., Inclusions in wrought superalloys: a review. *Journal of Iron and Steel Research International*, 28(8), 921-937, (2021).
- [5] Sreenu, B., Sarkar, R., Kumar, S.S., Chatterjee, S., & Rao, G.A., Microstructure and mechanical behaviour of an advanced powder metallurgy nickel base superalloy processed through hot isostatic pressing route for aerospace applications. *Materials Science and Engineering A*, 797, 140254, (2020).
- [6] Wohlers, T., & Gornet, T., History of additive manufacturing. *Wohlers report*, 24(2014), 118, (2014).
- [7] Guler, S., Serindag, H.T., & Çam, G., Wire arc additive manufacturing (WAAM): Recent developments and prospects, *Engineer and Machinery*, 63(706), 82-116, (2022). <https://doi.org/10.46399/muhendismakina.1085716>.
- [8] Cam, G., Prospects of producing aluminum parts by wire arc additive manufacturing (WAAM), *Mater Today Proc*, 62(1), 149-198 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.02.137>.
- [9] Ozer, G., A review on additive manufacturing technologies, *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 9 (1), 606-621, (2020). <https://hdl.handle.net/11352/3583>.
- [10] Graybill, B., Li, M., Malawey, D., Ma, C., Alvarado-Orozco, J. M., & Martinez-Franco, E., Additive manufacturing of nickel-based superalloys. In *International Manufacturing Science and Engineering Conference*, Vol. 51357, s. V001T01A015. American Society of Mechanical Engineers (2018). <https://doi.org/10.1115/MSEC2018-6666>.
- [11] Çavdar, F., Günen, A., Kanca, E., Er, Y., Gök, M. S., Campos-Silva, I., & Olivares-Luna, M., An experimental and statistical analysis on dry sliding wear failure behavior of Incoloy 825 at elevated temperatures. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 1-24, (2022). <https://doi.org/10.1007/s11665-022-07381-4>.
- [12] Cam, G., Fischer, A., Ratjen, R., dos Santos, J.F., Kocak, M., Properties of Laser Beam Welded Superalloys Inconel 625 and 718. *in Proc. of 7th European Conference on Laser Treatment of Materials, ECLAT '98*, September 21-23, 1998, Hannover, Germany, ed. B.L. Mordike, pub. Werkstoff-Informationsgesellschaft mbH, Frankfurt, pp. 333-338, (1998).
- [13] Çam, G., Koçak, M., Progress in joining of advanced materials - Part II: Joining of metal matrix composites and joining of other advanced materials. *Sci Technol Weld Join*, 3 (4), 159-175, (1998). <https://doi.org/10.1179/stw.1998.3.4.159>.
- [14] Çam, G., Koçak, M., Progress in joining of advanced materials. *Int Mater Rev*, 43(1), 1-44, (1998). <https://doi.org/10.1179/imr.1998.43.1.1>.
- [15] Ceritbinmez F., Günen A., Gürol U., Çam G., A comparative study on drillability of Inconel 625 alloy fabricated by wire arc additive manufacturing, *Journal of Manufacturing Processes*, 89, 150-169 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2023.01.072>.
- [16] Günen A., Gürol U., Koçak M., Çam G., Investigation into the influence of boronizing on the wear behavior of additively manufactured Inconel 625 alloy at elevated temperature, *Progress in Additive Manufacturing*, (2023). <https://doi.org/10.1007/s40964-023-00398-8>.
- [17] Wu, C. Li, X. Xia, H. Liang, Q. Qi, Y. Liu, Precipitate coarsening and its effects on the hot deformation behavior of the recently developed γ' -strengthened superalloys, *J. Mater. Sci. & Tech.*, 67, 95-104, (2021). <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2020.06.025>.
- [18] Hu, Y., Lin, X., Li, Y., Ou, Y., Gao, X., Zhang, Q., Li, W., Huang, W., (2021). Microstructural evolution and anisotropic mechanical properties of Inconel 625 superalloy fabricated by directed energy deposition, *J. Alloy. Compd.*, 870, 159426, (2021). <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.159426>.
- [19] Luo, J., Yu, W., Xi, C., Zhang, C., Ma, C., Preparation of ultra fine-grained GH4169 superalloy by high-pressure torsion and analysis of grain refinement mechanism, *J. Alloy. Compd.*, 777, 157-164, (2019). <https://doi.org/10.1016/>

- j.jallcom.2018.10.385.
- [20] Shahwaz, M., Nath, P., & Sen, I., A critical review on the microstructure and mechanical properties correlation of additively manufactured nickel-based superalloys. *Journal of Alloys and Compounds*, 164530, (2022). <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2022.164530>.
- [21] Soydan, O., Göv, K., Eyerciöglü, Ö., Surface finishing of aerospace materials. *El-Cezeri*, 7, 700-709, (2020). <https://doi.org/10.31202/ecjse.691548>.
- [22] Karataş, M.A., & Gökçaya, H., A review on machinability of carbon fiber reinforced polymer (CFRP) and glass fiber reinforced polymer (GFRP) composite materials. *Defence Technology*, 14(4), 318-326, (2018). <https://doi.org/10.1016/j.dt.2018.02.001>.
- [23] Parida, A.K., & Maity, K., Comparison the machinability of Inconel 718, Inconel 625 and Monel 400 in hot turning operation. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 21(3), 364-370, (2018).
- [24] Waghmode, S.P., & Dabade, U.A., Optimization of process parameters during turning of Inconel 625. *Materials Today: Proceedings*, 19, 823-826, (2019).
- [25] Datta, S., Biswal, B.B., & Mahapatra, S.S., Machinability analysis of Inconel 601, 625, 718 and 825 during electro-discharge machining: on evaluation of optimal parameters setting. *Measurement*, 137, 382-400, (2019). <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.01.065>.
- [26] Günen, A., Ceritbinmez, F., Patel, K., Akhtar, M. A., Mukherjee, S., Kanca, E., & Karakas, M.S., WEDM machining of MoNbTaTiZr refractory high entropy alloy. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 38, 547-559, (2022). <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2022.05.021>.
- [27] Mishra, D.K., Rahul, Datta, S., Masanta, M., & Mahapatra, S.S., Through hole making by electro-discharge machining on Inconel 625 super alloy using hollow copper tool electrode. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, 233(2), 348-370, (2019). <https://doi.org/10.1177/0954408918784701>.
- [28] Ceritbinmez, F. & Kanca, E., The effects of cutting parameters on the kerf and surface roughness on the electrode in electro erosion process. *Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology*, 9(2), 335-346, (2021). <https://doi.org/10.29109/gujsc.913417>.
- [29] Choudhary, S.K., Jadoun, R.S., & Singh, P., Optimization of EDM process parameters for TWR on machining of Inconel 600 superalloy using Taguchi approach. *Materials Today: Proceedings*, 57, 2281-2288, (2022). <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.01.059>.
- [30] Sahoo, S.K., Thirupathi, N., & Saraswathamma, K., Experimental investigation and multi-objective optimization of die sink EDM process parameters on inconel-625 alloy by using utility function approach. *Materials Today Proceedings*, 24, 995-1005, (2020).
- [31] Singh, B., & Singh, M., Performance of different electrode materials in Electric Discharge Machining (EDM) Inconel 600. *In Proceedings of 12th IRF International Conference*, 29th June-2014, Pune, India, pp. 68-71, (2014).
- [32] Urtekin, L., Bozkurt, F., Özerkan, H., Çoğun, C. & Uslan, İ., Ti6Al4V alaşımının elektro erozyon ile işleminde elektrolitik Cu ve CuBe takım elektrotlarının performansının karşılaştırılması. *El-Cezeri*, 8 (3), 1455-1461, (2021). <https://doi.org/10.31202/ecjse.946472>.
- [33] Opoz, T., Yasar, H., Murphy, M., Ekmekci, N. & Ekmekci, B., Ti6Al4V Surface modification by hydroxyapatite powder mixed electrical discharge machining for medical applications. *International Journal of Advances in Engineering and Pure Sciences*, Özel Sayı 1, 1-10, (2019). <https://doi.org/10.7240/jeps.450383>.
- [34] Yuvaraj, N., Raja, R.A., Palanivel, P., & Kousik, N.V., EDM process by using copper electrode with Inconel 625 material. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 811(1), 012011, (2020).
- [35] Akıncıoğlu, S., Taguchi metodu ve gri ilişkisel analizi kullanılarak 1,2316 paslanmaz çeliğin (R65) mikro-elektro erozyon delme kabiliyetinin değerlendirilmesi. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 9 (2), 646-660, (2021). <https://doi.org/10.29130/dubited.833720>.
- [36] Ji, R., Liu, Y., Diao, R., Xu, C., Li, X., Cai, B., & Zhang, Y., Influence of electrical resistivity and machining parameters on electrical discharge machining performance of engineering ceramics. *PloS One*, 9(11), e110775, (2014). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0110775>.
- [37] Ahmed, A., Tanjilul, M., Rahman, M., & Kumar, A.S., Ultrafast drilling of Inconel 718 using hybrid EDM with different electrode materials. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 106(5), 2281-2294, (2020). <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04769-w>.