

MIG VE ARK KAYNAĞI İLE TAMİR EDİLMİŞ AISI 1050 ÇELİĞİNİN TRİBOLOJİK ÖZELLİKLERİNE KAYNAK TELİNİN ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Koray KILIÇAY^{1*}, Mustafa Çağatay ERGENE², Salih Can DAYI³

¹ ESOĞÜ Müh.-Mim. Fak. Makine Mühendisliği Bölümü, ORCID No : <http://orcid.org/0000-0003-2025-4991>

² Eskişehir Şişecam Makine Bakım Onarım Departmanı, ORCID No : <https://orcid.org/0000-0002-2046-7922>

³ ESOĞÜ, Müh.-Mim. Fak. Makine Mühendisliği Bölümü, ORCID No : <https://orcid.org/0000-0002-0683-2727>

Anahtar Kelimeler	Öz
MIG Kaynak Teli Tamir Sürtünme ve Aşınma	<i>Son yıllarda hasar görmüş makine parçalarının düşük maliyetli kaynak yöntemleri ile tamir edilip tekrar kullanılması yaygın hale gelmiştir. Bu çalışmada imalat sektöründe yaygın olarak kullanılan MIG ve ark kaynak yöntemleri ile beş farklı kaynak teli kullanılarak AISI 1050 çeliğine kaynaklı tamir işlemleri uygulanmıştır. MIG yönteminde SG2 kalite ve paslanmaz kaynak telleri, ark kaynağında rutil, bazik ve paslanmaz kaynak telleri kullanılmıştır. Tamir edilmiş numunelerin mikroyapı, mikrosertlik, sürtünme ve aşınma davranışları incelenmiştir. Mikroyapı incelemeleri optik mikroskop ile gerçekleştirilmiştir. Aşınma deneyleri ASTM G99 standartına uygun olarak kuru şartlarda pim-disk yöntemi ile yapılmıştır. Aşınma kanalları yüzey profilometresi ile ölçülerek spesifik aşınma oranları hesaplanmıştır. Aşınmış yüzeyler SEM ve EDS analizi ile incelenerek aşınma mekanizmaları belirlenmiştir. Tamir edilmiş numunelerin kaynak bölgelerinde çatlak, boşluk vb. mikroyapısal kusurlar tespit edilmemiştir. Tamir edilmiş tüm numunelerin mikrosertlik değerleri AISI 1050 çeliğinden yüksek çıkmıştır. En yüksek ortalama mikrosertlik değerleri paslanmaz kaynak teli ile tamir edilmiş numunelerde tespit edilmiştir. Tamir işlemleri sonrası numunelerin aşınma performansı yaklaşık 3 kat artmıştır. En yüksek aşınma direnci MIG yöntemi ve SG2 kalite kaynak teli kullanılan numunede tespit edilmiştir.</i>

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF WELDING WIRE ON THE TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF AISI 1050 STEEL REPAIRED BY MIG AND ARC WELDING

Keywords	Abstract
MIG Welding Wire Repair Friction and Wear	<i>In recent years, repairing and reusing damaged machine parts with low-cost welding methods has become common. In this study, repair processes were applied to AISI 1050 steel using MIG and arc welding methods, widely used in the manufacturing industry, and five different welding wires. SG2 quality and stainless welding wires were used in the MIG method, and rutile, basic and stainless welding wires were used in arc welding. The repaired samples' microstructure, microhardness, friction, and wear behaviors were examined. Microstructural examinations were carried out using optical microscopy. Wear tests were performed using the pin-disc method under dry conditions in accordance with the ASTM G99 standard. Specific wear rates were calculated by measuring wear channels with a surface profilometer. The worn surfaces were examined by SEM and EDS analysis and the wear mechanisms were determined. No microstructural defects such as cracks, voids, etc. were detected in the weld areas of the repaired samples. The microhardness values of all repaired samples were higher than AISI 1050 steel. The highest average microhardness values were detected in samples repaired with stainless welding wire. After the repair operations, the wear performance of the samples increased approximately 3 times. The highest wear resistance was determined in the sample using the MIG method and SG2 quality welding wire.</i>

Araştırma Makalesi

Başvuru Tarihi

Kabul Tarihi

: 13.12.2023

: 29.04.2024

Research Article

Submission Date

Accepted Date

: 13.12.2023

: 29.04.2024

* Sorumlu yazar: kkilicay@ogu.edu.tr

<https://doi.org/10.31796/ogummf.1404233>



Bu eser, Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>) hükümlerine göre açık erişimli bir makaledir.

This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Giriş

Bir makine parçasının kullanım ömrü tasarım ve imalat işlemlerinde belirlenir. Belirlenen ömrün sonunda parçanın değiştirilmesi gerektiği kabul edilir (Gagg ve Lewis, 2007). Endüstride her yıl milyonlarca büyük metal parça üretilmekte ve kullanılmaktadır. İleri teknolojiler kullanılsa bile parçaların imalatında ve çalışma şartlarında meydana gelen aşırı yükler nedeniyle veya ağır hizmet şartlarından kaynaklanan çeşitli hasarlar oluşabilmektedir (Li, Han, Horváth ve Zhang, 2019). Mühendislik yapıları, hizmet ömürleri boyunca oldukça yüksek mekanik yüklere ve zorlu çevre koşullarına maruz kalır (Farahani, Sarhadi, Alizadeh-Sh, Fæster, Danielsen ve Eder, 2023). Mühendislik parçaları genellikle uzun süreli hizmet koşulları sırasında tekrarlı yükler sonucu yorulma, sürünme, termal şok, kaplama tabakalarının kalkması, korozyon, aşınma vb., mekanizmalar ile arızalanır (Yurioka ve Horii, 2013). Kullanım ömründen önce gerçekleşen hasarlar ise aşınma mekanizmalarından kaynaklanabilmektedir (Gagg ve Lewis, 2007). Hizmet koşullarında mühendislik parçaları yapısal bütünlüğünü korumak ve istenen tasarım ömrünü yerine getirmek için kaynakla tamir gerektirebilir (Das Banik, Kumar, Singh ve Bhattacharya 2022). Son yıllarda iyi mekanik özellikleri, düşük maliyeti, korozyona dayanıklı yapısı ve geri dönüşümü bulunan çeliğin çeşitli sektörlerde kullanımı hızla artmaktadır. Çelik parçalar endüstrideki yüksek iş yükü koşulları nedeniyle düzenli bakım ve onarım gerektirmektedir. Çelik parçaların kaynağı montaj ve tamir uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır (Singh, Kumar, Kumar ve Kumar, 2022).

Kaynak, benzer veya farklı iki veya daha fazla metalin ısı ve/veya basınç uygulanarak birleştirildiği bir imalat işlemidir. Çoğu kaynak yönteminde basınç uygulanmadan sadece ısı kullanılır. Bu işlemler sırasında kullanılan ısı; bir elektrik arkıyla, elektrik direnciyle veya gaz yanması gibi yöntemler ile elde edilebilir. Kaynak, iki metal parçasının ergime sıcaklıklarına ısıtılmasını ve tek bir kalıcı parça oluşturacak şekilde bir araya getirilmesini içeren bir birleştirme işlemidir. Isıtma işlemi sırasında, iki parçanın birleştirilmesine yardımcı olmak için genellikle kaynak dolgu metali olarak bilinen ilave metal kaynak havuzuna eklenir (Sahoo ve Tripathy, 2021). Dolgu teli ana metale benzer bileşimdedir ve daha düşük ergime sıcaklığına sahiptir. Kaynak bölgesine daha fazla malzeme sağlamak, boşlukları doldurmak ve kaynak işlemi sırasında meydana gelen kayıpları telafi etmek amacıyla kullanılır (Tsfaye ve Getaneh, 2023). Kaynak; imalat, otomotiv, havacılık ve gemi inşa endüstrilerinde birleştirme ve onarım için kullanılan en yaygın işlemidir (Sahoo ve Tripathy, 2021). İhtiyaç ve çalışma şartlarına göre çeşitli kaynak teknikleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Elektrik ark kaynağı, işlemin basitliği nedeniyle yaygın olarak kullanılan bir kaynak yöntemidir. Aynı zamanda kaynakta, kaynak metalinin

oluşması nedeniyle prosesin kontrol edilmesi zordur (Dement'yev, Sterkhov ve Solov'yev, 2020). Ark kaynağı; basitlik, taşınabilirlik, hem alternatif hem de doğru akımla uygulanabilir olmasıyla işlevsellik ve iş parçası malzemesini ergitmek için daha yüksek sıcaklıklara dayanabilme yeteneği nedeniyle diğer kaynak yöntemlerinden daha fazla tercih edilir (Sahoo ve Tripathy, 2021). Ark kaynağında ısı kaynağı elektrik arkıdır. Bir elektrik arkında ulaşılan sıcaklıklar 5500°C'ye kadar çıkabilir. Elektrik arkı, kaynak elektrodu ile iş parçası arasındaki boşluk tarafından kasıtlı olarak oluşturulan sürekli bir kıvılcımdır. Daha büyük ısı çıkışı ve daha az oksidasyon nedeniyle, elektrik arkıyla üretilen kaynağın kalitesi gaz kaynağına göre çok daha iyidir. Ark kaynağı için A.C. veya D.C. güç kaynağı kullanılabilir (Gupta, Gupta ve Mittal, 2009). Metal inert gaz (MIG) çeşitli endüstriyel alanlarda yaygın olarak kullanılan gaz korumalı ark kaynak yöntemidir (Cui, Chen, Xia, Han, Su, ve Wu, 2023). Üretim endüstrilerinde MIG kaynağı, daha hızlı ve daha ekonomik bir üretim süreci olduğundan yaygın olarak kullanılmaktadır. MIG kaynağı; gemi inşa endüstrileri, demiryolu endüstrileri, nükleer endüstriler, petrokimya endüstrileri, petrol rafinerisi, boru hatları endüstrileri vb. gibi çok sayıda imalat endüstrisinde sıklıkla kullanılan bir işlemdir (Ali Rizvi ve Ali, 2023). MIG kaynağı; kullanım kolaylığı, kaynak hızının yüksek olması ve dolayısıyla üretim miktarının yüksek olması nedeniyle yaygın olarak kullanılan bir kaynak tekniğidir (Singh ve diğ., 2022). Kaynak bağlantıları ve ark, koruyucu gazla çevresel kirlilikten korunur. Dolgu teli, kaynak havuzuna otomatik beslenirken, elektrik arkı ile ergiyerek kaynak havuzuna dahil olur (Arunakumara, Sagar, Gautam, George ve Rajeesh, 2023). MIG kaynak işleminin çalışma prensibi, bu işlemdeki elektrotun makara formunda olması ve işlem sırasında sürekli olarak işe doğru beslenmesidir. Aynı zamanda inert gaz aynı torçtan geçirilir. İntert gaz olarak genellikle argon kullanılır. Koruyucu gaz havanın ergimiş metal ile temas etmesini önlemek için kullanılır, gaz beslendiğinde iyonize olur ve elektrot ile iş parçası arasında ark başlatılır (Tsfaye ve Getaneh, 2023).

Son zamanlarda, elektrik arkına dayalı kaynak işlemleri, hasarlı mekanik bileşenlerin onarımı veya yeniden imalatındaki kullanılabilirliğinden dolayı imalat sektöründe büyük ilgi görmüştür (Farfan-Cabrera, Reséndiz-Calderón, Hernandez-Peña, Campos-Silva, Gallardo-Hernández ve Contla-Pacheco, 2023). Kaynak yöntemi; yüksek verimlilik, geniş uygulanabilirlik ve tamir edilen katman ile altlık malzeme arasında yüksek bağlanma mukavemeti avantajlarına sahiptir (Li, Chai, Tang, Zhang, Qi, Zhang, Peng ve Huang, 2023) Kaynaklı tamir yöntemi çeliklerin çalışması sırasında veya üretiminde meydana gelen hataların düzeltilmesi için yapılan dolgu kaynağı yöntemidir. Çeliklerde meydana gelen hataların üretimi durdurması, parçaların sökülüp tekrar takılması, yeni parça siparişi ve üretimi gibi zaman

kayıpları işletmelere önemli ölçüde ekonomik yük getirebilir. Aynı zamanda kaynaklı tamir edilmiş parçadan hasar oluşmadan önceki performansını sağlaması ve çalışma ömrünün uzaması beklenmektedir. AISI 1050 çeliğinin MIG ve ark kaynağı ile tamir edilmesinin araştırıldığı bu çalışmada farklı kaynak tellerinin tribolojik özellikleri üzerinde durulmuştur. Literatür araştırması, kullanılan malzeme ve yöntemler ile elde edilen bulgular tartışılmıştır.

2. Bilimsel Yazın Taraması

Güvenlik, ekonomik, teknolojik ve ticari nedenlerden dolayı sektörde parça onarımı ihtiyacı uzun zaman önce ortaya çıkmıştır. Uzun süredir var olan ihtiyaca rağmen günümüzde bile manuel onarım endüstriyel uygulamalarda hala en yaygın kullanılan yaklaşımdır (Li ve diğ., 2019). Araştırmacılar çeşitli kaynak yöntemleri ile çelikler ve alüminyum gibi hafif metallerin tamir uygulamaları üzerine çalışmışlardır. Ancak araştırmalar genellikle kaynak parametrelerinin optimizasyonu üzerine odaklanmıştır. Farklı kaynak telleri mikroyapısal değişikliğe neden olarak tamir kaynaklarının mekanik özelliklerini etkileyebilir (Hou, Xu, Wang, Zhang, She, Li, Xiao, Tang ve Pan, 2022). Ayrıca literatürde kaynaklı tamir edilmiş parçaların tribolojik özellikleri üzerine yapılmış araştırmalar oldukça kısıtlıdır. Literatürdeki benzer çalışmalar aşağıda özetlenmiştir.

Ayan, Sarı ve Kahraman (2018) çalışmalarında üç boyutlu metal yazıcıya MIG-MAG kaynak yöntemini entegre ederek hasarlı bir dişli çarkın tamir edilmesini araştırmışlardır. Üç boyutlu metal yazıcıya bağladıkları MIG-MAG torcu ile kaynak teli beslemesi yaparak hasarlı bölgeye dolgu kaynağı uygulamışlardır. Dişli çark malzemesi olarak S235JR, kaynak teli olarak SG2 tel kullanmışlardır. Tamir bölgesinde gözle görülür hatalara rastlamamışlardır.

Başığit (2020) çalışmasında alüminyum esaslı taşıt jantlarının kaynaklı tamirini incelemiştir. TIG kaynak yöntemi ile tamir sonrası mekanik ve mikroyapısal özellikleri karşılaştırmıştır. Tamir işlemi sonrası işlem görmemiş ana malzemeye göre mikroyapıda ve mikrosertlik değerlerinde önemli bir değişim olmadığını belirlemiştir.

Arslan ve Toplan (2023) çalışmalarında AA6061 alüminyum alaşımına MIG ve TIG kaynak yöntemi ile yapılan kaynaklı tamir işleminin etkilerini incelemiştir. Dolgu teli olarak ER5356 %5 magnezyum alaşım alüminyum tel kullanmışlardır. Radyografik muayene sonucunda kaynak dikişlerinde süreksizlik tespit etmemişlerdir. MIG kaynağının mukavemetinin TIG kaynağının çekme mukavemetinden daha fazla olduğunu belirlemiştir. TIG kaynağının ısı girdisi daha fazla olduğu için tamir işleminden sonra daha fazla distorsiyon (çarpılma) gözlemlenmiştir.

Farfan-Cabrera vd. (2023) çalışmalarında, ark kaynağı ile tamir edilen düşük karbonlu AISI 1018 çeliği üzerine tribolojik olarak iyileşme için borlama uygulanmasının etkilerini incelemiştir. Onarılan çeliğin borlamadan önceki ve sonraki tribolojik davranışlarını incelemiştir. MIG kaynak yöntemi ve ER70S-6 kaynak teli kullanmışlardır. Ayrıca borür kaplamanın hem orijinal malzemedeki hem de onarılan bölgedeki fiziksel ve mekanik özelliklerini optik mikroskop, X-ışını kırınımı, sertlik testleri ve yapışma testi ile değerlendirmişlerdir. Kaynaklı tamir edilmiş bölgelerin sertliğinin kaynaklanmamış bölgelerden daha düşük olduğunu belirlemiştir. Borlanmamış numunelerin aşınma hacmi kaynaklı bölgede kaynaklı bölgeye göre daha yüksek olurken, borlanmış numunelerde kaynaklı ve kaynaklı bölgeler arasında önemli bir fark olmadığını tespit etmişlerdir. Ancak hem borlanmış hem de borlanmamış numuneler için kaynaklı ve kaynaklı bölgeler arasında anlamlı bir sürtünme katsayısı farkı belirlemediği belirtilmiştir.

Lee, Lee ve Kim (2022) MIG kaynak makinesi tel ark katmanlı imalat yöntemini kullanarak, hasarlı çapraz kızaklı torna tezgâhı parçasının, nikel alaşım tel kullanarak tamir edilmesini araştırmışlardır. Tamir edilen parçanın mikroyapısını, kimyasal bileşimini ve mekanik özelliklerini araştırmışlardır. Tamir işlemi sırasında işlem parametrelerini belirlemek için ön deneyler yapmışlardır. Tamir edilmiş bölgede gözeneksiz bir mikroyapı elde etmiş ve sertlik değerlerinde ana malzemeye göre artış elde etmişlerdir.

Li vd. (2023) çalışmalarında 27SiMn çelik yüzeyinin kaynaklı tamir yöntemi ile tamir edilmesini incelemiştir. Tamir malzemesi olarak 316L paslanmaz çelik tel ve toz kullanmışlardır. Tamir edilen bölgenin belirgin kusurlar içermediğini ve altlık malzemeye iyi bir metalürjik bağ ile bağlandığını belirlemiştir. Tamir edilmiş bölgenin korozyon direncinin alt tabakaya göre daha üstün olduğunu tespit etmişlerdir. Tamir edilmiş bölgenin aşınma testleri sonucunda aşınmanın abrasif ve oksidatif aşınma mekanizmaları ile gerçekleştiğini belirlemiştir.

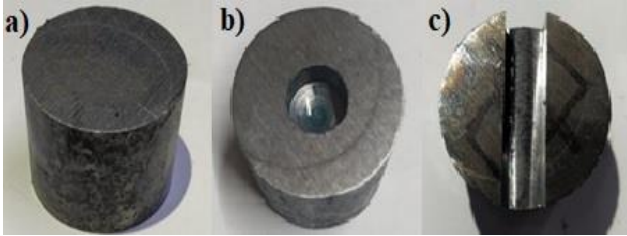
Li, Dong, Wang, Liu, Tan, Shangguan, Lu ve Zhong (2020) çalışmalarında alüminyum 7N01-T4 ve 7N01-T5 alaşımlarının MIG kaynağı ile kaynatıldıktan sonra, tamir kaynağının kaynaklı bağlantının mikro yapısına ve mekanik özelliklerine etkisini araştırmışlardır. Kaynak dolgu metali olarak ER5356 ve koruyucu gaz olarak yüksek saflıkta argon gazı kullanmışlardır. Orijinal kaynaklı bağlantının ve tamir edilmiş kaynaklı bağlantının çekme mukavemetini sırasıyla 283 MPa ve 280 MPa olarak tespit etmişlerdir ve mühendislik uygulamalarında talepleri karşılayabileceğini vurgulamışlardır.

Naing ve Muangjunburee (2022) çalışmalarında alüminyum 6082-T6 alaşımının MIG kaynak yöntemi ile tamir edilmesini araştırmışlardır. Kaynak dolgu metali

olarak ER 4043 ve ER 5356 kullanarak tamir kaynağının metalurjik ve mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini belirlemişlerdir. ER 5356 dolgu maddesiyle kaynak tamiri yapılan AA6082-T6 bağlantılarında daha yüksek gözeneklilik oluştuğunu belirlemişlerdir. ER 5356 dolgu maddesi ile yapılan tamir kaynağının, ER 4043 dolgu maddesi ile yapılandırılan daha yüksek çekme mukavemetine sahip olduğunu bulmuşlardır.

3. Yöntem

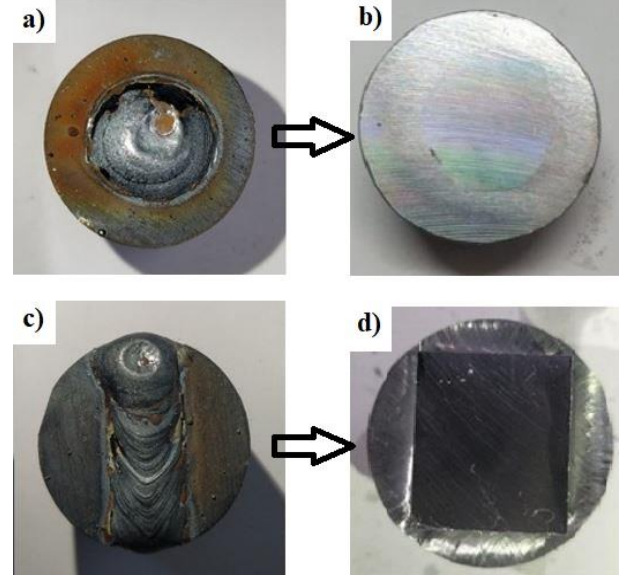
Kaynaklı tamir işlemi uygulanacak AISI 1050 çelik numunelere talaşlı imalat yöntemleri kullanılarak kanal ve delik geometrileri işlenmiştir. 28 mm çapında ve 26 mm yüksekliğinde AISI 1050 numunelere; mikroyapı incelemelerinde kullanılmak üzere 7 mm genişliğinde, 6 mm derinliğinde kanallar frezelenmiş ve aşınma deneylerinde kullanılmak üzere 10 mm çapında ve 6 mm derinliğinde delikler delinmiştir (Şekil 1).



Şekil 1. a) AISI 1050 Çelik Numune: b) Aşınma Deneyi için Hazırlanan Delik c) Mikroyapı İncelemesi için Hazırlanan Kanallın Görüntüsü.

Talaşlı imalat yöntemleri ile hazırlanan hasarlı AISI 1050 numuneler iki farklı kaynak yöntemi ve beş farklı kaynak teli kullanılarak tamir işlemine tabi tutulmuştur. Kaynaklı tamir işlemi sonrası numune yüzeyleri tekrar frezelenerek incelemeler için hazırlanmıştır (Şekil 2). Mikroyapı numuneleri tamir edilmiş bölgelerinden dik kesit olarak kesilerek incelenmiştir.

Kaynaklı tamir yöntemi olarak elektrik ark (EA) kaynağı (Gekamac arc 200lt) ve MIG kaynağı (Erdemsan e350) kullanılmıştır. Kaynaklı tamir yöntemlerinde kullanılan kaynak parametreleri Tablo 1' de verilmiştir. MIG yönteminde SG2 kalite (Magmaweld MG2) ve paslanmaz (Magmaweld MI 308LSi) kaynak telleri, ark kaynağında rutil (Magmaweld ESR 13), bazik (Magmaweld Esb 48) ve paslanmaz (Magmaweld EI 308L) kaynak dolgu telleri kullanılmıştır. Kullanılan kaynak dolgu tellerinin yüzde kimyasal bileşimleri Tablo 2' de verilmiştir. Tüm kaynak telleri yüzde kalan değer kadar demir elementi içermektedir.



Şekil 2. Numunelerin Makro Görüntüsü: a)Kaynaklı Tamir Sonrası Aşınma Numunesi, b)Frezelenmiş Aşınma Numunesi, c)Kaynaklı Tamir Sonrası Mikroyapı Numunesi ve d)Frezelenmiş Mikroyapı Numunesi.

Tablo 1. Kaynaklı Tamir Yöntemlerinde Kullanılan İşlem Parametreleri.

Kaynak Parametreleri	Ark Kaynağı	MIG Kaynağı
Akım (A)	120	240
Tel besleme hızı (m/dk)	elle	14
Tel kalınlığı (mm)	3.25	1.2
Kaynak dolgusu	rutil bazik paslanmaz	SG2 paslanmaz

Tablo 2. Kaynak Dolgu Tellerinin Kimyasal Bileşimleri (%Ağ.)

Dolgu telleri	C	Si	Mn	Cr	Ni
Rutil(EA)	0.07	0.45	0.6	-	-
Bazik (EA)	0.08	0.4	1.1	-	-
Paslanmaz (EA)	0.02	0.7	0.9	19.5	10
SG2 (MIG)	0.07	0.9	1.45	-	-
Paslanmaz (MIG)	0.01	0.7	1.9	20	9.5

Tamir işlemleri sonrası numunelerin mikroyapı işlemleri için dik kesit numuneleri ıslak kesme yöntemi ile kesilmiş, 660 ve 220 grit zımparalar ile zımparalanmıştır. Parlatma işlemleri için çeşitli çuhalar ile 9 µm, 3 µm ve 1 µm elmas solüsyon kullanılmıştır. Optik mikroyapı incelemeleri Nikon Eclipse L150 mikroskopta gerçekleştirilmiştir. Mikroyapı numuneleri için gerçekleştirilen metalografik numune hazırlama işlem adımları, mikrosertlik ve aşınma deneyi numunelerine de uygulanmıştır. Mikrosertlik ölçümleri Future-Tech FM700 cihazında 100gf yük ve 10 saniye bekleme süresi kullanılarak yapılmıştır. Numunelerin dik kesitinden, yüzeyden içeriye doğru 1 mm aralıklar

ile sertlik ölçümleri alınmış ve her numune için bu işlem üç kere tekrarlanmıştır. Ölçülen sertlik değerleri ile ortalama sertlik değerleri hesaplanmış ve yüzeyden içeriye doğru sertlik dağılımları elde edilmiştir. Aşınma testlerinden önce numunelerin yüzey pürüzlülüğünden etkilenmemesi için yüzey parlatma işlemi ile ortalama yüzey pürüzlülüğünün yaklaşık 0.2 µm değerine getirilmesi sağlanmıştır. Kuru şartlarda ASTM G99 standartlarına uygun CSM tribometre kullanılarak aşınma deneyleri gerçekleştirilmiş ve sürtünme katsayısı değerleri kaydedilmiştir. Deneylerde WC aşındırıcı karşı cisim (Ø3 mm), 5N yük, 100 metre aşınma mesafesi ve 190 dev/dk kullanılmıştır. Aşınma deneyleri sonrası aşınma kanalları yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazı ile ölçülerek aşınma hacmi hesaplanmıştır. Elde edilen verilerden Denklem 1' e göre aşınma oranları hesaplanmıştır. Aşınma kanalları SEM ve EDS analizleri ile incelenmiş ve aşınma mekanizmaları tespit edilmiştir.

$$W = \frac{V}{F \times L} \quad (1)$$

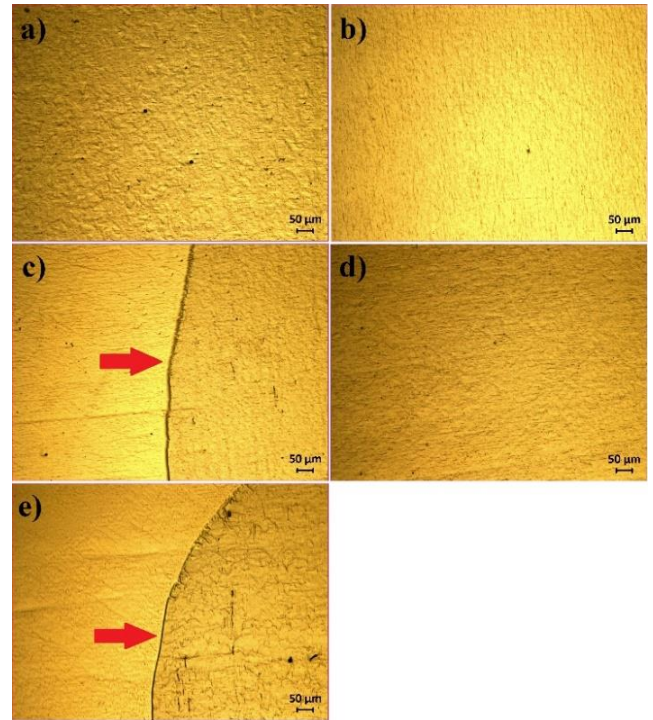
Burada; W aşınma oranı (mm³/N/m), V aşınma hacmi (mm³), F kuvvet (N) ve L aşınma mesafesi (m)' dir. Çalışmada, araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

4. Bulgular

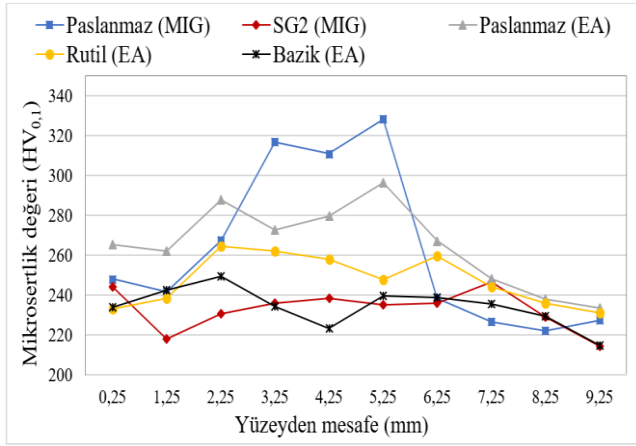
Kaynakla tamir edilmiş beş farklı numuneye ait mikroyapı görüntüleri Şekil 3' de verilmiştir. Şekil 3-a, 3-b ve 3-c elektrik ark kaynaklı tamir edilmiş yüzeyleri; Şekil 3-d ve 3-e MIG kaynağı ile tamir edilmiş yüzeyleri göstermektedir. Kaynakla doldurulan bölgelerde çatlak, boşluk vb. mikroyapısal kusurlar tespit edilmemiştir. Bu durum seçilen kaynak yöntemi, işlem parametreleri ve kaynak tellerinin doğru seçildiğini göstermektedir. Kaynakla tamir edilmiş numunelerden paslanmaz tel kullanılan iki numunede de ana metal ve tamir bölgesi arasında belirgin geçiş oluşmuştur. Geçiş bölgeleri Şekil 3-c ve 3-e' de kırmızı ok ile gösterilmiştir. Bazik, rutil ve SG2 tel kullanılmış numunelerde geçiş bölgeleri belirgin değildir. Bu durum AISI 1050 altık çeliğinin kimyasal bileşimi ile bazik, rutil ve SG2 kaynak tellerinin kimyasal bileşiminin benzer olması ile açıklanabilmektedir.

Şekil 4' te kaynakla tamir edilmiş beş numuneye ait yüzeyden içeriye doğru 1 mm mesafelerde alınmış mikrosertlik değerleri ve Tablo 3' te tamir edilmiş numunelerin ortalama mikrosertlik değerleri verilmiştir. Yüzeyden içeriye doğru alınan mikrosertlik ölçümlerinde dalgalanmalar belirlenmiştir. Bu durumun nedeni ilave dolgu tellerinin kaynak havuzu içinde ergiyerek kompozit bir mikroyapı oluşturmasından kaynaklanmaktadır. Aynı zamanda kaynak havuzu içindeki soğuma hızı farklılıklarının da bu duruma neden olduğu düşünülmektedir. İşlemsiz AISI 1050 numunenin ortalama mikrosertlik değeri 219.7±10.1 HV_{0.1} olarak ölçülmüştür. Kaynakla tamir edilmiş numunelerin tümünde ortalama mikrosertlik değerleri

işlemsiz AISI 1050 numunesinden yüksek çıkmıştır. Paslanmaz (MIG), SG2 (MIG), paslanmaz (EA), rutil (EA) ve bazik (EA) kaynak telleri ile tamir edilmiş numunelerin ortalama mikrosertlik değerlerinde sırasıyla yaklaşık olarak %19.5, %5.5, %20.5, %12.5 ve %6.5 değerinde artış olmuştur. En yüksek sertlik değerleri paslanmaz tel kullanılan kaynaklı tamir yöntemlerinde elde edilmiştir. Bu durumun, paslanmaz tellerin içinde bulunan Ni ve Cr elementlerinin muhtemel karbür yapıları oluşturması ile ilgili olduğu düşünülmektedir. Kaynaklı tamir yöntemi uygulanmış numunelerde sertlik artışının ana nedeni kaynak akımı ile ergitilen bölgelerdeki ısı girdisi ve hızlı soğuma etkisidir. Kaynakta çıkan yüksek sıcaklık sonrası soğuma hızı, kritik soğuma hızını aştığında bu bölgelerde sert bir yapı olan martenzitik yapı oluşumu görülür. MIG yönteminde kullanılan teller 1,2 mm ve EA yönteminde kullanılan teller 3.25 mm çapındadır. Çapı düşük olan MIG yöntemi tellerinde numuneler üzerinde açılan kanalları tamir etmek için daha çok paralel kaynak dikişi atılması gerekmektedir. Daha yüksek sayıda atılması gereken paralel kaynak dikişleri daha önce atılan kaynak dikişlerini ilave ısıya maruz bırakmıştır. Bu durum bu numunelerin sertliğinde bir miktar azalmaya neden olmuştur.



Şekil 3. Tamir Edilmiş Numunelerin Optik Mikroyapı Görüntüleri: a) Rutil (EA), b)Bazik (EA), c) Paslanmaz (EA), d) SG2 (MIG) ve e) Paslanmaz (MIG).

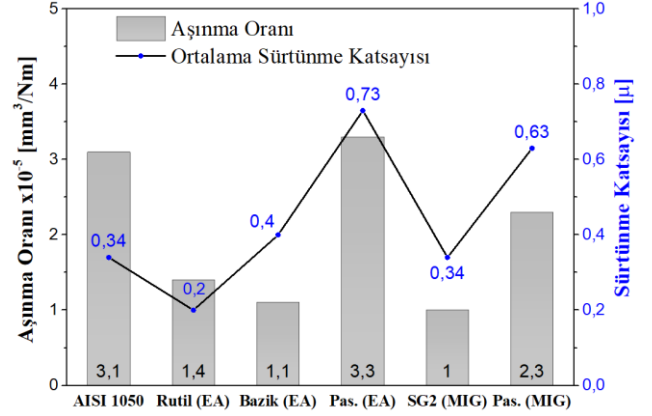


Şekil 4. Tamir Edilmiş Numunelerin Yüzeyden İçeriye Mikrosertlik Dağılım Grafiği.

Tablo 3. Tamir Edilmiş Numunelerin Ortalama Mikrosertlik Değerleri.

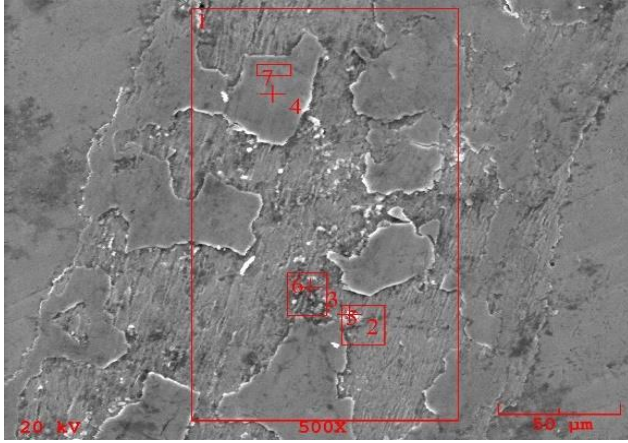
Birimler	Ortalama Mikrosertlik (HV _{0,1})	Sapma Değeri (±)
Rutil(EA)	247.5	12.7
Bazik (EA)	234.2	9.8
Paslanmaz (EA)	265.2	20.6
SG2 (MIG)	232.8	10.3
Paslanmaz (MIG)	262.8	40.9

Kuru kayma şartlarında gerçekleştirilen aşınma test sonuçlarından elde edilen aşınma oranları ve ortalama sürtünme katsayısı değerleri Şekil 5' te verilmiştir. En yüksek ortalama sürtünme katsayısı değeri paslanmaz tel (EA) numunesinde, en düşük ortalama sürtünme katsayısı değeri rutil (EA) numunesinde tespit edilmiştir. Paslanmaz (MIG) ve paslanmaz (EA) numunelerinde diğer numunelerden daha yüksek ortalama sürtünme katsayısı değerleri belirlenmiştir. Aşınma oranları incelendiğinde, paslanmaz (EA) numunesi hariç diğer kaynaklı tamir edilmiş numunelerin tamamında, AISI 1050 numuneye göre aşınma performansında iyileşme elde edilmiştir. En düşük aşınma oranı SG2 (MIG) numunesinde elde edilmiş ve bu numunede aşınma direnci yaklaşık 3 kat artmıştır. En yüksek aşınma oranı tespit edilen paslanmaz (EA) numunesinde AISI 1050 numunesine oldukça yakın aşınma performansı tespit edilmiştir.



Şekil 5. Numunelerin Aşınma Oranı ve Ortalama Sürtünme Katsayısı Değerleri.

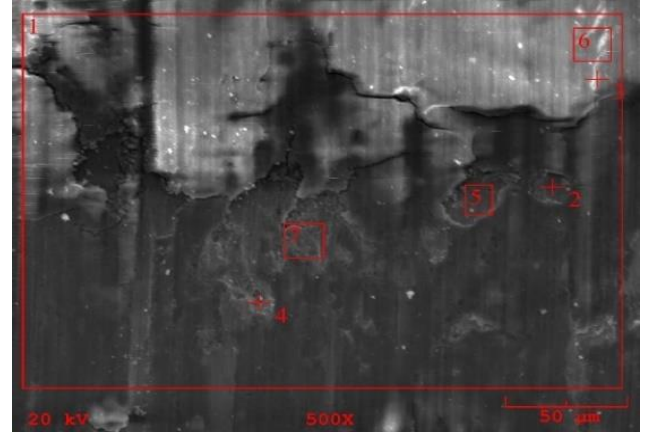
Aşınma deneylerinden sonra, kaynakla tamir edilmiş numuneler ve işlemsiz AISI 1050 numunesinin sürtünme davranışlarının ve aşınma mekanizmalarının belirlenebilmesi için aşınma kanalları SEM ve EDS analizi ile incelenmiştir. İşlemsiz AISI 1050 numunesine ait aşınma kanalı SEM görüntüsü ve EDS analizi sonuçları Şekil 6' da verilmiştir. Bu numunesinin aşınma kanalı SEM görüntülerinde abrasif aşınma izleri görülmektedir. Abrasif aşınma izleri aşındırıcı karşı cisim olarak kullanılan yüksek sertlikteki WC küre tarafından oluşturulmuştur. Aşınma kanalının EDS analizinde yüksek oksijen elementi tespit edilmiştir. Temas halindeki cisimlerin içinde bulunmayan oksijen elementinin varlığı, triboksite tabakalarının oluştuğunun ispatıdır. Temas halindeki cisimlerin sürtünmesiyle oluşan ısı, triboksite tabakaları üretimi ile sonuçlanmıştır. Oluşan triboksite tabakaları aşınma deneyinde belli bölgelerde yüzeyden kalkarak temas halindeki cisimler arasında üçüncü cisim gibi davranmış ve abrasif aşınmanın daha da şiddetlenmesine neden olmuştur. Ayrıca EDS analizi sonucunda aşınma kanalında tespit edilen W elementi aşındırıcı karşı cisimden AISI 1050 çeliğine malzeme transfer olduğu göstermektedir. Bu durum, aşınma deneyinde adhesif aşınmanın da etkili olduğunu göstermektedir. EDS analizi sonuçlarında bölge 4 kimyasal element dağılımı incelendiğinde, AISI 1050 çelik numunede bulunmayan yüksek W ve O elementlerinin varlığı triboksite tabakalarının bu elementleri içerdiğini doğrulamaktadır. Oluşan oksit tabakaları metal-metal temasını azaltarak sürtünme katsayısının da azalmasına neden olmuştur. Bu numunesinin ana aşınma mekanizmalarının abrasif, oksidatif ve adhesif olduğu yorumu yapılabilir.



Bölge	Elementler							
	Fe	C	Si	Mn	O	W	P	S
1	73.847	1.965	0.274	0.915	14.127	8.796	0.047	0.028
2	89.854	1.160	0.434	0.824	5.873	1.598	0.120	0.137
3	90.321	2.302	0	0.803	3.765	2.415	0.257	0.137
4	51.552	0	0.343	0.850	25.448	21.497	0.115	0.195
5	77.713	4.531	0.167	0.553	11.523	5.277	0.150	0.086
6	83.139	4.102	0.129	0.784	8.983	2.632	0.064	0.165
7	60.504	0.643	0.326	0.598	22.441	15.397	0.016	0.075

Şekil 6. İşlemsiz AISI 1050 Numunesinin Aşınma Kanalı SEM Görüntüsü ve EDS Analizi Sonuçları.

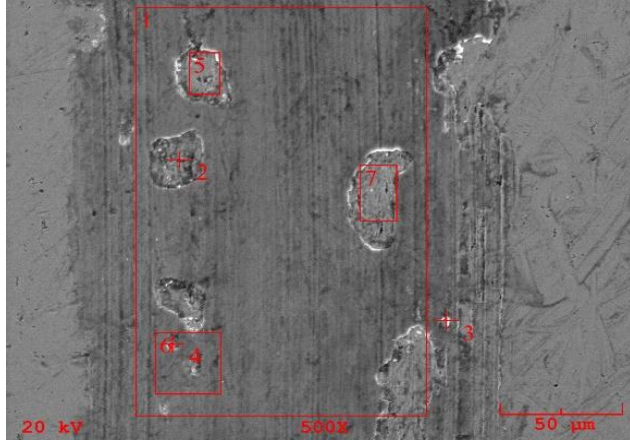
Paslanmaz (MIG) numunesinin aşınma kanalının SEM görüntüsü ve EDS analizi sonuçları Şekil 7' de verilmiştir. MIG kaynağı ile tamir edilmiş bu numunede EDS analizinde yüksek W içeriği tespit edilmiştir. Bu durum aşındırıcı karşı cisimden adhezyon mekanizması ile transfer olduğunu göstermektedir. Aynı zamanda aşınma kanalının SEM görüntüsünde abrasif izler tespit edilmiştir. Bu numunenin sertlik değerindeki artış, abrasif aşınma mekanizmasının etkilerini bir miktar azaltmıştır. Numunenin EDS analizi sonuçlarındaki yüksek oksijen içeriği triboksit tabakalarının varlığını doğrulamaktadır. Oluşan triboksit tabakaları aşınma deneyi sırasında yüzeyden kalkarak aşınmanın şiddetlenmesine neden olmuştur. Ayrıca bu numunede tespit edilen, diğer numunelere oranla daha yüksek ortalama sürtünme katsayısının nedeni de budur. Yüzeyden kırılarak ayrılan oksit tabakaları metal-metal temasını engellemeyerek daha yüksek sürtünme katsayısına neden olmuştur.



Bölge	Elementler							
	Fe	C	Si	Mn	Cr	Ni	O	W
1	44.560	0.686	0.723	0.746	12.028	4.653	25.416	11.188
2	61.044	1.081	0.637	1.520	17.143	6.972	8.115	3.488
3	39.197	0	0.784	1.095	9.967	4.437	30.718	13.802
4	64.311	0	0.692	1.446	17.776	7.816	5.376	2.584
5	61.810	0.263	0.648	1.240	16.810	6.635	8.780	3.814
6	39.034	0.531	1.114	0.960	10.666	3.866	29.312	14.519
7	52.061	1.670	0.424	1.017	15.189	5.968	16.875	6.797

Şekil 7. Paslanmaz (MIG) Numunesinin Aşınma Kanalı SEM Görüntüsü ve EDS Analizi Sonuçları.

SG2 (MIG) numunesinin aşınma kanalının SEM görüntüsü ve EDS analizi sonuçları Şekil 8' de verilmiştir. Bu numunenin aşınma kanalı SEM görüntüsünde ve EDS analizinde geniş bir bölgeye yayılmış kalın triboksit tabakaları tespit edilmiştir. EDS analizlerinde tespit edilen yüksek oksijen içeriği ile bu durum doğrulanmaktadır. Kuru şartlarda gerçekleştirilen aşınma deneylerinde uygulanan yük ve artan sürtünme mesafelerinin etkisiyle triboksit tabakalarının bir kısmı kırılarak yüzeyden ayrılmıştır. Oluşan triboksit tabakalarının az bir kısmı yüzeyden ayrıldığı için kalan oksit tabakaları metal-metal temasını engelleyerek düşük sürtünme katsayısının oluşmasını sağlamıştır. Benzer ortalama sürtünme katsayısı değerleri elde edilen işlemsiz AISI 1050 numunesinde de benzer triboksit tabakaları tespit edilmiştir. Ayrıca numunenin aşınma kanalı SEM görüntüsünde tespit edilen abrasif izler, ana aşınma mekanizmasında oksidatif aşınma ile birlikte abrasif aşınmanın da etkili olduğu göstermektedir.



Bölge	Elementler					
	Fe	C	Si	Mn	O	W
1	70.807	4.424	0.645	0.930	17.433	5.595
2	87.800	4.877	0.597	1.258	2.837	2.507
3	76.171	5.177	0.375	1.105	13.152	3.805
4	74.297	2.892	0.463	1.105	15.638	5.448
5	85.980	4.346	0.586	1.201	4.502	3.272
6	73.964	3.450	0.551	0.803	16.678	4.369
7	86.786	3.147	0.524	1.470	5.523	2.400

Şekil 8. SG2 (MIG) Numunesinin Aşınma Kanalı SEM Görüntüsü ve EDS Analizi Sonuçları.

Paslanmaz (EA) numunesinin aşınma kanalının SEM görüntüsü ve EDS analizi sonuçları Şekil 9' da verilmiştir. Bu numunenin aşınma kanalı incelemeleri sonucunda geniş abrasif izler ve ince triboksit tabakalarının varlığı tespit edilmiştir. Aşınma kanallarında tespit edilen triboksit tabakalarının varlığı EDS analizlerinde tespit edilen oksijen elementi varlığı ile ispatlanmıştır. Artan aşınma mesafesi ve yüklerin etkisi ile triboksit tabakaları kırılarak yüzeyden ayrılmıştır. Oksit tabakalarının aşınma yüzeyinden kalkması bu numunede diğer numunelere kıyasla daha yüksek sürtünme katsayısı oluşmasına neden olmuştur. Aynı zamanda yüzeyden kalkan triboksit tabakaları temas ara yüzeyinde kalarak üçüncü cisim gibi davranmış ve abrasif aşınmanın etkilerinin daha da şiddetlenmesine neden olmuştur. Bu nedenle bu numunede yüksek aşınma oranı ve sürtünme katsayısı belirlenmiştir. Bu numunede ana aşınma mekanizmasının abrasif ve oksidatif aşınma olduğu şeklinde yorumlanmıştır.

Rutil (EA) numunesinin aşınma kanalının SEM görüntüsü ve EDS analizi sonuçları Şekil 10' da verilmiştir. Bu numunenin aşınma kanalları SEM görüntüsünde diğer numunelere kıyasla daha az abrasif aşınma izi olduğu tespit edilmiştir. EDS analizi sonuçlarına göre geniş bir bölgede triboksit tabakalarının oluştuğu tespit edilmiştir. Az miktarda triboksit tabakası kırılarak yüzeyden kalkmış olsa da yüzeyin aşınma kanalının geniş bir bölgesinde kalan triboksit tabakaları metal-metal temasını azalttığı için sürtünme katsayısının azalmasını sağlamıştır. Bu nedenle

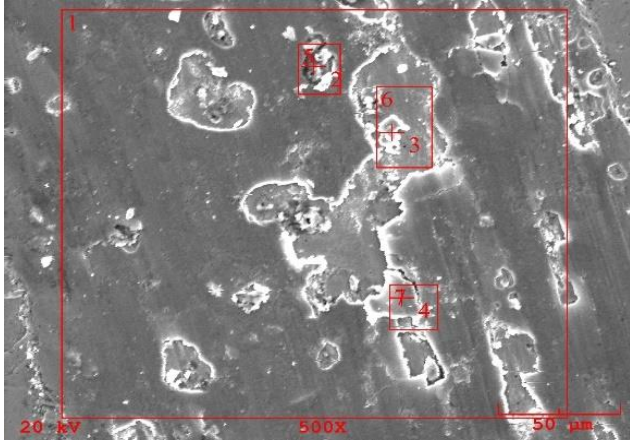
bu numunede en düşük sürtünme katsayısı değeri elde edilmiştir. Diğer numuneler ile kıyaslandığında bir miktar daha az W elementi tespit edildiği için adhesif aşınma etkisinin azaldığı yorumlanabilir. Bu nedenle bu numunedeki baskın aşınma mekanizmasının oksidatif aşınma olduğu ve yanında abrasif ve adhesif aşınmanın ise daha az etkili olduğu şeklinde yorumlanmıştır.



Bölge	Elementler							
	Fe	C	Si	Mn	Cr	O	W	Ni
1	64.203	1.467	0.398	0.634	12.849	11.784	2.998	5.666
2	48.670	4.800	0.449	0.310	9.791	27.415	4.608	3.956
3	70.366	0.513	0.502	0.730	13.401	6.503	1.747	6.237
4	53.730	0.760	0.248	0.359	11.238	19.510	9.271	4.883
5	54.622	3.841	0.366	0.740	11.126	20.385	4.166	4.754
6	57.055	1.166	0.582	0.103	12.085	20.539	3.348	5.121
7	67.413	1.111	0.151	0.529	13.802	6.317	3.860	6.817

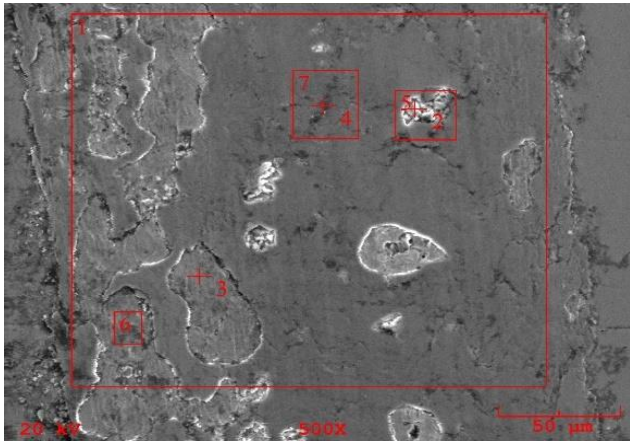
Şekil 9. Paslanmaz (EA) Numunesinin Aşınma Kanalı SEM Görüntüsü ve EDS Analizi Sonuçları.

Bazik (EA) numunesinin aşınma kanalının SEM görüntüsü ve EDS analizi sonuçları Şekil 11' de verilmiştir. Bu numunenin aşınma kanalı SEM ve EDS incelemelerinde geniş bir bölgeye yayılmış triboksit tabakaları tespit edilmiştir. Bu sonuç EDS analizindeki yüksek oksijen elementi varlığı ile doğrulanmıştır. Bu numunenin aşınma kanalı SEM görüntülerinde abrasif izler tespit edilmemiştir. Triboksit tabakaları kırılmadan aşınma yüzeyinde kaldığı için hem sürtünme katsayısının kısmen düşük olmasına sebep olmuştur, hem de ara yüzeyde üçüncü cisim gibi davranarak abrasif aşınmanın şiddetlenmesinin önüne geçmiştir. Bu nedenle bu numunede daha yüksek aşınma performansı elde edilmiştir. Aşınma kanallarının EDS analizinde aşındırıcı karşı cisimden adhezyonu gösteren W elementi bu numunede tespit edilmiştir. Bu nedenle bu numunede oksidatif aşınmanın yanında adhezyon aşınma mekanizmasının da etkili olduğu düşünülmektedir.



Bölge	Elementler					
	Fe	C	Si	Mn	O	W
1	75.608	2.593	0.085	0.530	19.497	1.687
2	60.714	11.435	0.106	0.334	25.962	1.448
3	96.704	0	0.029	0.467	1.168	1.631
4	74.162	1.297	0.052	0.479	22.336	1.674
5	68.315	5.732	0.235	0.477	23.385	1.855
6	80.443	3.596	0.390	0.419	13.108	2.044
7	74.438	2.093	0.287	0.434	20.754	1.994

Şekil 10. Rutil (EA) Numunesinin Aşınma Kanalı SEM Görüntüsü ve EDS Analizi Sonuçları.



Bölge	Elementler					
	Fe	C	Si	Mn	O	W
1	65.488	2.938	0.625	0.594	17.167	13.188
2	53.346	4.121	0.385	0.746	23.735	17.666
3	92.156	0.752	0.409	0.935	3.160	2.587
4	59.767	2.023	0.027	1.099	20.766	16.317
5	57.915	2.522	0.644	0.639	21.992	16.288
6	82.482	3.763	0.424	0.842	11.357	1.132
7	59.035	1.914	0.288	1.001	21.178	16.584

Şekil 11. Bazık (EA) Numunesinin Aşınma Kanalı SEM Görüntüsü ve EDS Analizi Sonuçları.

5. Sonuçlar

Bu çalışmada, hasarlı AISI 1050 çelik yüzeyi MIG ve EA kaynak yöntemleri ve beş farklı kaynak teli kullanılarak başarılı bir şekilde onarılmıştır. Elde edilen bulgular aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

- Tamir uygulamaları sonrası önemli bir mikroyapısal kusur oluşmamıştır. Bu durum tamir işlem ve parametrelerinin uygun seçildiğinin göstergesidir.
- Kaynaklı tamir edilmiş numunelerin tümünde ortalama mikrosertlik AISI 1050 çeliğinden yüksek çıkmıştır. En yüksek ortalama mikrosertlik değerleri yüksek Ni ve Cr içerikli paslanmaz kaynak dolgu tellerinde elde edilmiştir.
- Paslanmaz kaynak telleri ile yapılan kaynaklı tamir işlemlerinde sürtünme katsayısı değerleri daha yüksek ölçülmüştür. Bu numunelerin aşınma kanalı SEM ve EDS analizlerinde triboksit tabakalarının yüzeyden kırılarak kalktığı ve metal-metal temasını diğer numuneler kadar engellemediği tespit edilmiştir. Kırılan triboksit tabakaları temas ara yüzeyinde üçüncü cisim gibi davrandığından abrasif aşınmayı şiddetlendirmiş ve en yüksek aşınma oranlarının bu numunelerde oluşmasına neden olmuştur.
- Rutil kaynak teli ve EA ile kaynaklı tamir edilmiş numunede geniş bir bölgeye yayılan triboksit tabakaları sayesinde düşük sürtünme katsayısı değerleri elde edilmiştir.
- En yüksek aşınma direnci MIG kaynak yöntemi ve SG2 kalite kaynak teli kullanılan numunede elde edilmiştir. Bu numunenin ana aşınma mekanizmaları oksidatif ve abrasif olarak belirlenmiştir.
- AISI 1050 çeliğinin kaynaklı tamir işlemlerinde kaynak tellerinin sürtünme ve aşınma performansı üzerinde oldukça etkili olduğu sonucuna varılmıştır. SG2 kaynak teli ile aşınma performansı yaklaşık 3 kat arttırılmıştır. Rutil ve bazık kaynak telleri ile ise sırasıyla aşınma performansları 2.2 ve 2.8 kat artmıştır.
- Deneysel çalışmalar ile elde edilen sonuçlar, uygun kaynak telleri ile tamir sonrası makine parçalarında daha uzun hizmet ömrü sağlanabileceğini göstermektedir.

Araştırmacıların Katkısı

Bu çalışmada; Koray KILIÇAY, bilimsel yayın araştırması, makalenin oluşturulması; Mustafa Çağatay ERGENE, deney tasarımı, deney uygulaması; Salih Can DAYI, deneysel sonuçların derlenmesi konularında katkı sağlamışlardır.

Çıkar Çatışması

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

Kaynaklar

- Ali Rizvi, S., ve Ali, W. (2023). Application of grey-based fuzzy logic algorithm in MIG welding-A case study. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 42, 101431. doi: 10.1016/j.jestch.2023.101431
- Arslan, M., ve Toplan, N. (2023). AA6061 Serisi Alüminyum Plakalarına Yapılan MIG ve TIG Kaynak Tamirlerinin Tahribatlı ve Tahribatsız Testlerle İncelenmesi. *Journal of Materials and Mechatronics: A*, 4(1), 333-354. doi: 10.55546/jmm.1284581
- Arunakumara, P. C., Sagar, H. N., Gautam, B., George, R., ve Rajeesh, S. (2023). A review study on fatigue behavior of aluminum 6061 T-6 and 6082 T-6 alloys welded by MIG and FS welding methods. *Materials Today: Proceedings*, 74, 293-301. doi: 10.1016/j.matpr.2022.08.242
- Ayan, Y., Sarı, E., ve Kahraman, N. (2018). 3B Metal Yazıcı Kullanılarak MIG-MAG Kaynak Yöntemi İle TamirOnarım Kaynak Uygulamasına Bir Örnek *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 6, 1190-1199.
- Başıyigit, A. B. (2020). Alüminyum Esaslı Taşıt Jantlarının TIG Kaynak Yöntemi ile Tamiri Sonrası Kaynak Bölgesinin Mekanik ve Mikroyapısal Özelliklerinin İncelenmesi *Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi*, 12(2), 388-396.
- Cui, X., Chen, J., Xia, C., Han, X., Su, H., ve Wu, C. (2023). The mechanism study of TIG-MIG hybrid welding process based on simulation. *Vacuum*, 215, 112341. doi: 10.1016/j.vacuum.2023.112341
- Das Banik, S., Kumar, S., Singh, P. K., ve Bhattacharya, S. (2022). Influence of weld repair on the residual stresses induced in austenitic stainless steel weld joints. *Production Engineering*, 17(1), 81-94. doi: 10.1007/s11740-022-01156-5
- Dement'yev, V. B., Sterkhov, M. Y., ve Solov'yev, S. D. (2020). Model of the hydrodynamic process of melting and crystallization of metal in the system 'electric arc – weld pool'. *Journal of Crystal Growth*, 531, 125335. doi: 10.1016/j.jcrysgro.2019.125335
- Farahani, E. B., Sarhadi, A., Alizadeh-Sh, M., Fæster, S., Danielsen, H. K., ve Eder, M. A. (2023). Thermomechanical modeling and experimental study of a multi-layer cast iron repair welding for weld-induced crack prediction. *Journal of Manufacturing Processes*, 104, 443-459. doi: 10.1016/j.jmapro.2023.08.059
- Farfan-Cabrera, L. I., Reséndiz-Calderón, C. D., Hernandez-Peña, A., Campos-Silva, I., Gallardo-Hernández, E. A., ve Contla-Pacheco, A. D. (2023). Tribological effects of boriding treatment on a low carbon steel repaired by wire and arc additive manufacturing. *Surface and Coatings Technology*, 465, 129574. doi: 10.1016/j.surfcoat.2023.129574
- Gagg, C. R., ve Lewis, P. R. (2007). Wear as a product failure mechanism – Overview and case studies. *Engineering Failure Analysis*, 14(8), 1618-1640. doi: 10.1016/j.engfailanal.2006.11.064
- Gupta, H. N., Gupta, R. C., ve Mittal, A. (2009). *Manufacturing Processes* (Second Edition ed.): New Age International Publishers.
- Hou, G., Xu, Y., Wang, S., Zhang, Y., She, J., Li, C., . . . Pan, F. (2022). Effects of welding wire composition on the repair welds of sand-cast Mg-Gd-Y alloy: Microstructure and mechanical properties. *Vacuum*, 199, 110919. doi: 10.1016/j.vacuum.2022.110919
- Lee, J.-H., Lee, C.-M., ve Kim, D.-H. (2022). Repair of damaged parts using wire arc additive manufacturing in machine tools. *Journal of Materials Research and Technology*, 16, 13-24. doi: 10.1016/j.jmrt.2021.11.156
- Li, S., Dong, H., Wang, X., Liu, Z., Tan, Z., Shangguan, L., . . . Zhong, S. (2020). Effect of repair welding on microstructure and mechanical properties of 7N01 aluminum alloy MIG welded joint. *Journal of Manufacturing Processes*, 54, 80-88. doi: 10.1016/j.jmapro.2020.03.009
- Li, Y., Han, Q., Horváth, I., ve Zhang, G. (2019). Repairing surface defects of metal parts by groove machining and wire + arc based filling. *Journal of Materials Processing Technology*, 274, 116268. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2019.116268
- Li, Z., Chai, L., Tang, Y., Zhang, C., Qi, L., Zhang, K., . . . Huang, C. (2023). 316L stainless steel repaired layers by weld surfacing and laser cladding on a 27SiMn steel: A comparative study of microstructures, corrosion, hardness and wear performances. *Journal of Materials Research and Technology*, 23, 2043-2053. doi: 10.1016/j.jmrt.2023.01.162
- Naing, T. H., ve Muangjumburee, P. (2022). Metallurgical and Mechanical Characterization of MIG Welded Repair Joints for 6082-T6 Aluminum Alloy with ER 4043 and ER 5356. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 75(6), 1583-1593. doi: 10.1007/s12666-022-02523-7
- Sahoo, A., ve Tripathy, S. (2021). Development in plasma arc welding process: A review. *Materials Today: Proceedings*, 41, 363-368. doi: 10.1016/j.matpr.2020.09.562

Singh, S., Kumar, V., Kumar, S., ve Kumar, A. (2022). Variant of MIG welding of similar and dissimilar metals: A review. *Materials Today: Proceedings*, 56, 3550-3555. doi: 10.1016/j.matpr.2021.11.287

Tesfaye, F. K., ve Getaneh, A. M. (2023). The Grey-Based Taguchi Method was used to enhance the TIG-MIG hybrid welding process parameters for mild steel. *Invention Disclosure*, 100016. doi: 10.1016/j.inv.2023.100016

Yurioka, N., ve Horii, Y. (2013). Recent developments in repair welding technologies in Japan. *Science and Technology of Welding and Joining*, 11(3), 255-264. doi: 10.1179/174329306x101382