

ESD Yöntemiyle Zırh Çelikleriyle Kaplanmış Inconel 718 Alaşımının Aşınma Davranışlarının İncelenmesi

*Makale Bilgisi / Article Info

Alındı/Received: 07.05.2024

Kabul/Accepted: 19.08.2024

Yayımlandı/Published: 02.12.2024

Investigation of Wear Behavior of Inconel 718 Alloy Coated with Armor Steels Using ESD

Yusuf KAYALI^{1*}, Merve ERMAK²

¹Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Afyonkarahisar, Türkiye

²Kameks Eksantrik Milleri, İstanbul, Türkiye

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

Öz

Inconel-718, en yaygın olarak kullanılan en önemli nikel esaslı süper alaşımlardan biridir. Inconel-718'in benzersiz özelliklerinden dolayı yaygın kullanıma rağmen, (ve diğer birçok süper alaşımın) aşınma özellikleri, özellikle yüksek sıcaklıklarda genellikle yetersiz kabul edilir. Bu yüzden günümüzde birçok yüzey işlemine tabii tutulmaktadır. Metalik yüzeylerde sert ve aşınmaya dayanıklı bir kaplama üretmek için gelecek vaat eden yöntemlerden biride Elektro Kıvılcım Biriktirme (ESD) yöntemidir. ESD metodu, diğer geleneksel yöntemlere kıyasla çok daha kuvvetli olarak bağlanan ve iyi bir yapışma sergileyen kaplamalar yapılmasını sağlayan ve kullanılan elektrotun darbeli (pulse) elektrik akımlarının oluşturduğu plazma formasyonu vasıtasıyla yüzeyde biriktirilmesi prensibine dayanan bir mikro-kaynak işlemidir. Bu çalışmada Inconel-718 alaşımı üzerine ESD tekniği kullanılarak farklı şartlarda Armoks-500T ve Ramor-500 zırh çelikleri ile yüzey kaplama işlemi yapılmıştır. Elde edilen kaplama tabakalarının özellikleri taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile karakterize edilmiştir. Tabaka kalınlıkları optik mikroskoba bağlı bir aparat yardımıyla ölçülmüştür. Elde edilen tabakaların yüzey sertlikleri Mikro sertlik yöntemiyle ölçülmüştür. Aşınma deneyleri ball-on-disk yöntemi ile 10 N yük altında 0.3 m/s de 500 metre mesafede gerçekleştirilmiştir. Aşınma mekanizmaları için Aşınma izi SEM analizleri yapılmıştır. ESD kaplama sonucunda Inconel-718 alaşımı üzerine her iki zırh kaplama malzemesi başarılı bir şekilde oluşturulmuştur. Kaplama tabakası kaplama şartlarına ve kaplama malzemesine bağlı olarak 5 µm' dan 26 µm kadar değişmektedir. Her iki zırh çeliği ile Inconel-718 alaşımının yüzey sertliği artırılarak, aşınma direnci yaklaşık olarak 1,5-11 kat iyileştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Elektro Kıvılcım Biriktirme, Inconel-718 Alaşımı, Armoks-500T, Ramor-500, Mikrosertlik, Aşınma Direnci.

Abstract

Inconel-718 is one of the most important nickel-based super alloys most widely used. Despite its unique combination of properties and widespread use, the wear properties of Inconel-718 (and many other super alloys) are generally considered inadequate, especially at elevated temperatures. Therefore, it is subjected to many surface treatments today. One of the promising methods to produce a hard and wear resistant coating on metallic surfaces is Electro Spark Deposition (ESD) method. The ESD method is a micro-welding process based on the principle of depositing the electrode used on the surface by means of the plasma formation created by pulsed electric currents, which provides much stronger bonding and good adhesion compared to other traditional methods. In this study, surface coating process was carried out with Armoks-500T and Ramor-500 armor steels under different conditions by using ESD technique on Inconel-718 alloy. The properties of the obtained coating layers were characterized by scanning electron microscopy (SEM). Layer thicknesses were measured with the aid of an apparatus connected to an optical microscope. The surface hardness of the obtained layers was measured by the Micro-hardness method. Wear tests were carried out with the ball-on-disk method under a load of 10 N at a distance of 500 meters at 0.3 m/s. Wear trace SEM analyzes were performed for wear mechanisms. As a result of ESD coating, both armor coating materials were successfully formed on Inconel-718 alloy. The coating layer varies from 5 µm to 26 µm depending on the coating conditions and coating material. By increasing the surface hardness of both armor steels and Inconel-718 alloy, the wear resistance has been improved approximately 1.5-11 times.

Keywords: Electro Spark Deposition, Inconel-718 Alloy, Armox-500T, Ramor-500, Micro-hardness, Wear Resistance.

1. Giriş

Inconel-718 alaşımı özellikle havacılık ve uzay sanayinde olmakla birlikte çok özel yerlerde (Kimya, Denizcilik ve Nükleer sektörlerinde, roket motor parçalarında, çok özel amaçlar için üretilen depo tanklarında, vanalarda, bağlantı elemanlarında ve türbin pervane bıçaklarında) kullanılmak üzere üretilmiştir (Bhattacharya vd. 1983, İnt. Kyn.1). Inconel 718 alaşımının benzersiz özellikleri ve yaygın kullanıma rağmen (ve diğer birçok süper alaşımın)

aşınma özellikleri, özellikle yüksek sıcaklıklarda genellikle yetersiz kabul edilir (Kurzynowski vd. 2017, Günen vd. 2017). Bu yüzden bu alaşımlar günümüzde yüzey işlemlerine tabii tutularak kullanılmaktadır. Alaşım kaplamaları oluşturmak için lazer kaplama (Shepeleva vd. 2000), vakumlu plazma püskürtme (Zhu vd. 2001), magnetron püskürtme (Abad vd. 2010), kimyasal-fiziksel buhar biriktirme (Jindal vd. 1987), ve borlama vb. dahil olmak üzere çeşitli kaplama teknolojileri kullanılmaktadır.

ESD (Elektro Kıvılcım Biriktirme); Aşınma direncini artırmak ve boyutsal bozuklukları düzeltmek için kısa süreli akım darbeleriyle ilave elektrot malzemesinin yüzeyde biriktirilmesi işlemidir (American Welding Society 2007, Kayali ve Talaş 2021). ESD, metal malzemelerin yüzey özelliklerinin geliştirilmesi için kullanılan basit bir işlem olarak günümüzde yaygın olarak kullanılmaktadır. Yüksek enerjili elektrik enerjisini depolamak için kondansatörlerin kullanılması ile metal altlık (Katot) ve elektrot (anot) arasında yüksek enerjili elektrik enerjisi yüksek frekanstan kaçınılması gibi süreçlerden oluşmaktadır (Rastkerdar vd. 2018). Meydana gelen deşarj, havanın iyonlaşmasını sağlar ve elektrot malzemesi ile iş parçası arasında bir kanal oluşturur ve iş parçasının yüzeyinde küçük, yüksek sıcaklık ve yüksek basınç alanlarının meydana gelmesi ile yüksek sıcaklık ve yüksek basınç iş parçasının yüzeyine nüfuz ederek malzeme yüzeylerinin gelişmesine olanak sağlar (Tang 2009). Inconel-718 süper alaşımının özellikle savunma sanayide kullanıldığını düşünürsek, zırh çelikleriyle kaplanmış olması, süper alaşımın dışarıdan gelebilecek etkilere karşı mekanik direncinin daha fazla olması anlamına gelir. Bu çalışmada Inconel-718 alaşımını Armoks-500T ve Ramor-500 Zırh çelikleri ile kaplayarak hem yüzey sertliğinde, hem de aşınma direncinde artış sağlanması amaçlanmıştır.

2. Materyal ve Metot

2.1 Kullanılan Malzemeler

Bu çalışma için Ø20 mm ebatlarındaki Inconel-718 alaşımı temin edilmiştir. Inconel-718 alaşımının kimyasal (spektral analizi) bileşimi Çizelge 1’de verilmiştir. Kesilen numuneler elektro kıvılcım biriktirme (ESD) işlemi ile Ramor-500 ve Armoks-500T zırh çelikleri ile kaplanmıştır. Kaplama elektrot olarak kullanılan zırh çeliklerin kimyasal bileşimleri Çizelge 2’de verilmiştir.

2.2 ESD Kaplama İşlemi

Kaplama işlemi için temel malzemeyi döndürme aparatı, akımın geçişi için hazırlanan deney düzeneği ve kaplama makinesinin görüntüleri Şekil 1’de verilmiştir. Inconel-718 alaşımının yüzeyine yapılan işlemlerin kodları Çizelge 3’de verildiği gibi farklı Voltaj, Kapasitans ve Frekanslar da gerçekleştirilmiştir. Yüzey düzgünlüğünü iyileştirmek ve oksit oluşumu riskini azaltmak için kaplama sırasında argon gazı kullanılmıştır. ESD kaplama 2 dakika süreyle gerçekleştirilmiştir. ESD kaplama işlemi sırasında, kıvılcım oluşumu, titreşimli elektrot aplikatörü ile dönen Inconel-718 süper alaşımı üzerindeki Zırh çeliklerinden yapılan (Ramor-500 veya Armoks-500T) elektroda hafif bir dokunuşla sağlanmıştır.

Çizelge 1. Inconel-718 alaşımının kimyasal bileşimi.

Çelik Türü	Kimyasal Bileşim (% Ağırlıkça)					
	C	Cr	Ni	Ti	Mn	Mo
Inconel-718	0,04	18,11	53,09	0,95	0,09	3,03
	Co	Cu	Nb	Fe	Al	Co
	0,21	0,17	5,05	18,64	0,53	0,21

Çizelge 2. Kaplama Malzemesi olarak kullanılan çeliklerin kimyasal bileşimi.

Çelik Türü	Kimyasal Bileşim (% Ağırlıkça)					
	C	Cr	Ni	Si	Mn	Mo
Ramor-500	0,35	1	2	0,7	1,5	0,7
	P	S	B			
	0,015	0,01	0,005			
Armoks-500T	C	Cr	Ni	Si	Mn	Mo
	0,32	1,01	1,81	0,4	1,2	0,7
	P	S	B			
	0,015	0,01	0,005			



Şekil 1. ESD düzeneği.

2.3 Metalografik Çalışmalar

Inconel-718 alaşımı üzerine ESD yöntemi ile Armoks-500T ve Ramor-500 zırh çelikleri ile kaplanmış numuneler hassas kesme cihazı ile kesilen numuneler sırasıyla 120, 240, 320, 600, 1000 ve 1200 gritlik zımparalar ile zımparalandıktan sonra % 3 µm’luk elmas pasta ile parlatılmıştır. Numuneler SEM mikroskop yardımıyla karakterize edilmiştir. Tabaka kalınlıkları optik mikroskoba bağlı bir aparat yardımı ile ölçülmüştür. Inconel-718 alaşımı üzerine ESD yöntemi ile Armoks-500T ve Ramor-500 zırh çelikleri ile kaplanmış numunelerin sertlik değerleri mikrosertlik cihazı (Shimadzu HM-2) 100 gr. yük altında ve 15 sn bekletme süresi ile gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 3. Inconel-718 alaşımına yapılan işlemler ve verilen kodlar.

Yapılan İşlemler	Kısaltmalar
40 Volt, 80 Kapasitans, 500 Frekans da ESD ile Armoks-500T elektrot ile kaplanmış numuneler	40V-80µF-500Hz Armoks-1
80 Volt, 40 Kapasitans, 500 Frekans da ESD ile Armoks-500T elektrot ile kaplanmış numuneler	80V-40µF-500Hz Armoks-2
80 Volt, 80 Kapasitans, 500 Frekans da ESD ile Armoks-500T elektrot ile kaplanmış numuneler	80V-80µF-500Hz Armoks-3
80 Volt, 120 Kapasitans, 500 Frekans da ESD ile Armoks-500T elektrot ile kaplanmış numuneler	80V-120µF-500Hz Armoks-4
40 Volt, 80 Kapasitans 500 Frekans da ESD ile Ramor-500 elektrot ile kaplanmış numuneler	40V-80µF-500Hz Ramor-1
80 Volt, 40 Kapasitans, 500 Frekans da ESD ile Ramor-500 elektrot ile kaplanmış numuneler	80V-40µF-500Hz Ramor-2
80 Volt, 80 Kapasitans, 500 Frekans da ESD ile Ramor-500 elektrot ile kaplanmış numuneler	80V-80µF-500Hz Ramor-3
80 Volt, 120 Kapasitans, 500 Frekans da ESD ile Ramor-500 elektrot ile kaplanmış numuneler	80V-120µF-500Hz Ramor-4

Yapılan sertlik ölçümleri, en az 20 farklı ölçümde en yüksek ve en düşük iki değer çıkartılıp geri kalan değerlerin ortalama değerleri ve standart sapmaları alınarak sertlik değerleri tespit edilmiştir.

2.4 Aşınma Deneyleri

Inconel-718 alaşımı üzerine ESD yöntemi ile Armoks-500T ve Ramor-500 zırh çelikleri ile kaplanmış numunelerin

sürtünme ve aşınma özellikleri ASTM G-99 standardına göre yapılmıştır. Aşınma testinden yüzeyin bozulmasından kaynaklı hataları ortadan kaldırmak için her test için ayrı olmak koşuluyla 8 mm çapında WC-Co bilyeler kullanılmıştır. Aşınma testleri, 10 N yük altında 500 metre mesafede, 0,3 m/s kayma hızında 20 C de oda sıcaklığında ve kuru ortamda yapılmıştır. Aşınma testinden sonra numunelerin aşınma hacimleri, aşınmanın enine kesit alanları ile Tribotechnic Rugosimeter cihazından elde edilen aşınma izinin genişliği çarpılarak sayısallaştırılmış ve aşınma oranı eşitlik 1'deki formülle hesaplanmıştır:

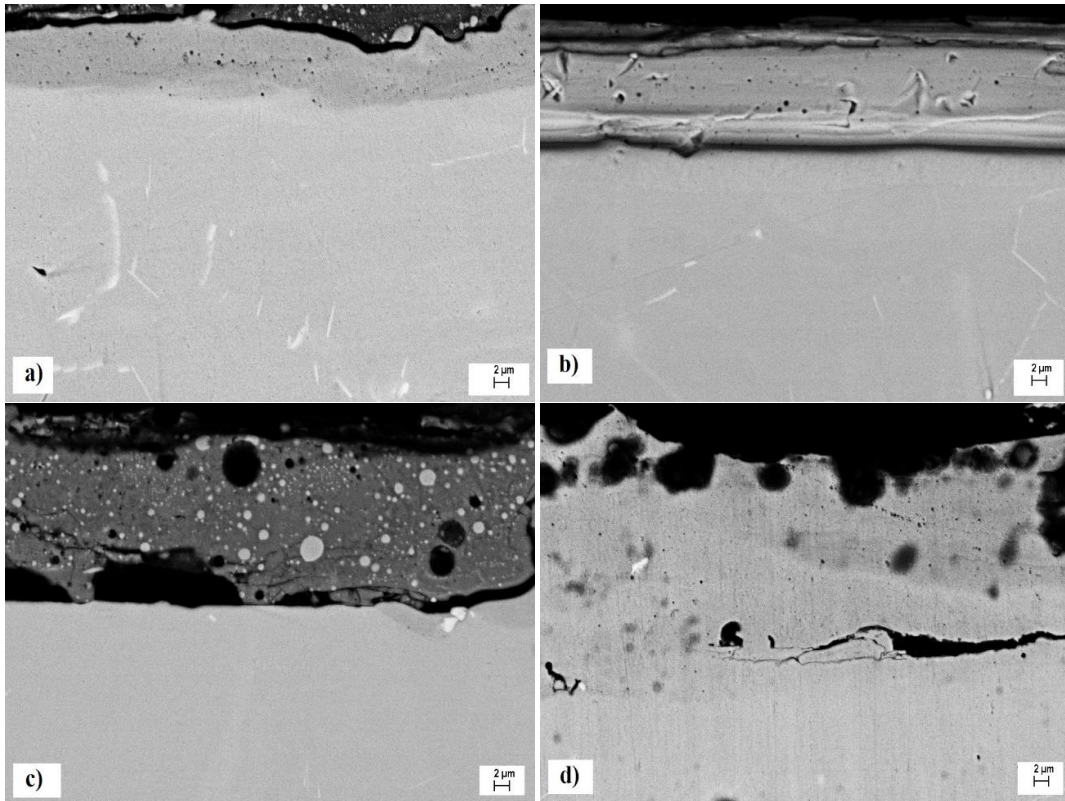
$$\text{Aşınma Hızı} = \frac{\text{Aşınma Hacmi}}{(\text{Uygulanan Yük} \times \text{Kayma Mesafesi})}, \text{mm}^3/\text{Nm} \quad (1)$$

3. Bulgular

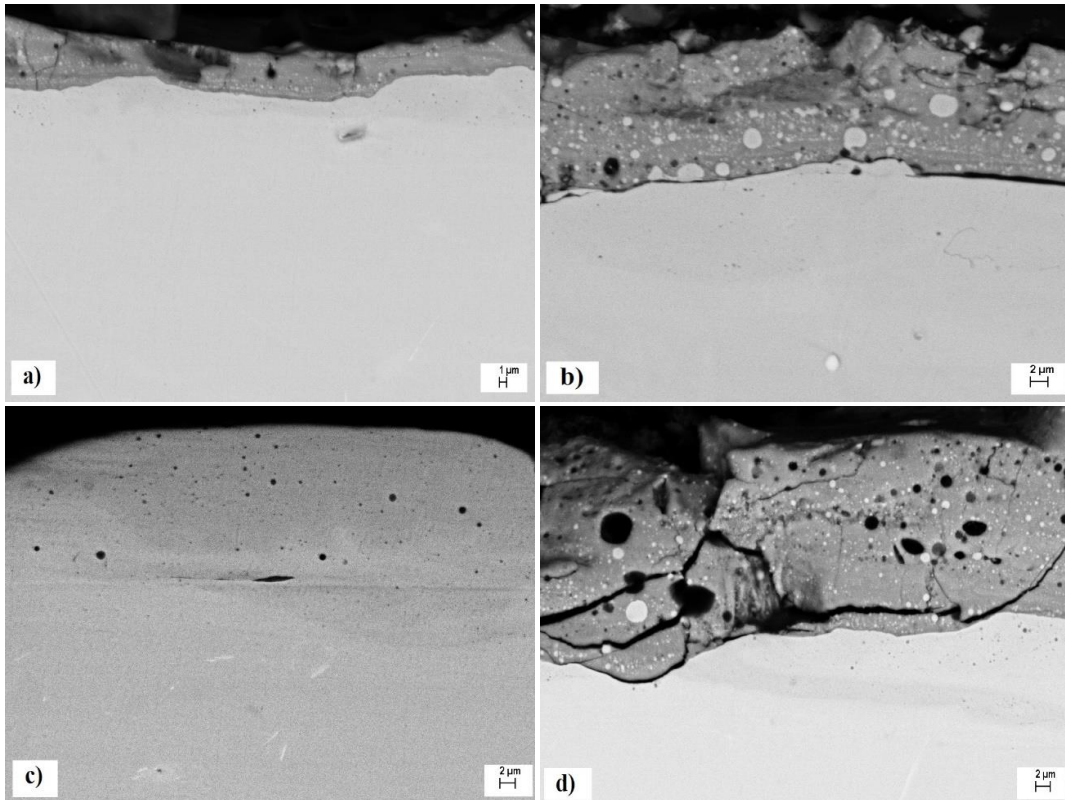
3.1 Mikroyapı Özellikleri

Şekil 2 ve Şekil 3'de Inconel-718 alaşımı üzerine ESD yöntemi ile Armoks-500T ve Ramor-500 zırh çelikleri farklı volt ve kapasitans şartlarında kaplanmış numunelerin SEM mikro yapı görüntüleri verilmiştir. Şekil 2 incelendiğinde, Inconel-718 alaşımın üzerine 40V-80µF-500Hz şartlarda Armoks-500T zırh çeliği kaplanan yapılan numunelerde elde edilen kaplama daha az kalınlıkta homojendir. Ancak kaplama yüzeyi düz değildir. 80V-40µF-500Hz şartlarında yapılan kaplamada ise daha düz ve homojen kaplama elde edilmiştir. 80V-80µF-500Hz ve 80V-120µF-500Hz şartlarda Armoks-500T kaplanan Inconel-718 de ise kapasitans değerlerinin artmasıyla kaplama kalınlığı artmakta ancak homojen olmayan ve gözenekli bir kaplama elde edilmiştir. Ayrıca kaplama ile matris arasında tam olarak bir birleşmenin olmadığı görülmektedir. Bu ise pek istenen bir olay değildir (Kayali ve Talaş 2019). Kaplama ana malzeme ara yüzeyinde tabakalaşma ve porozite şeklinde hatalar görülmekle beraber bu tür hatalar özellikle hızlı bir şekilde mikro arkların oluştuğu sistemlerde ortaya çıkabilmektedir. Genel olarak bu tür hataların diğer bir sebebi ise ısı genleşme katsayılarındaki farklılıklar yanında alaşımlandırmanın etkisiyle kaplamanın elektriksel iletkenliğe olan negatif etkisi de düşünülmektedir (Kayali ve Talaş 2019, Kayali ve Talaş 2021).

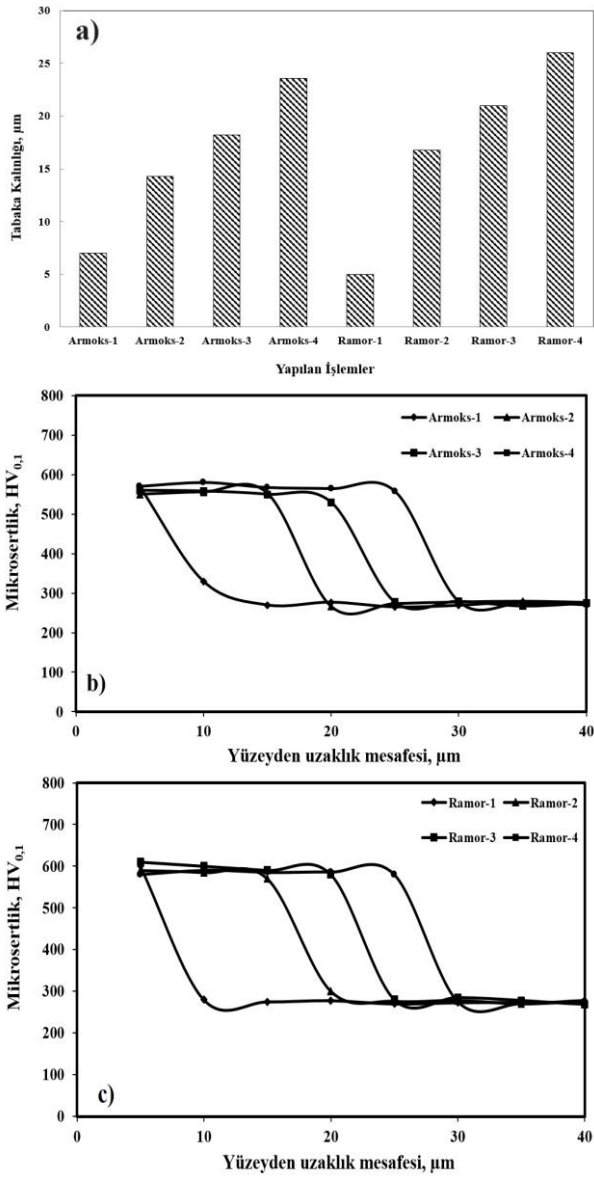
Şekil 3 incelendiğinde, Inconel-718 alaşımın üzerine 80V-80µF-500Hz şartlarda Ramor-500 zırh çeliği kaplanan numunelerde elde edilen kaplama homojen, düz ve gözeneksizdir. 40V dan 80 V a artıca tabaka kalınlığı artarken 40 µF kapasitansdan 80 µF kapasitans arttıkça hem kaplama kalınlığı artmıştır hem de tabaka homojen ve boşluksuzdur. Ancak kapasitans değeri 120 µF çıkınca tabakada kırıkların ve boşlukların arttığı görülmektedir.



Şekil 2. Inconel-718 çeliğinin yüzeyine ESD yöntemiyle a) Armoks-1, b) Armoks-2, c) Armoks-3 ve d) Armoks-4 kaplanmış numunelerin SEM resimleri.



Şekil 3. Inconel-718 çeliğinin yüzeyine ESD yöntemiyle a) Ramor-1, b) Ramor-2, c) Ramor-3 ve d) Ramor-4 kaplanmış numunelerin SEM resimleri.



Şekil 4. a) Farklı Şartlarda farklı kaplama malzemeleri ile Inconel-718 alaşımı üzerine oluşturulan kaplamaların kalınlığı, b) Inconel-718 yüzeyinde, Armoks-500T kaplama malzemesi ile Farklı şartlarda yapılan kaplamaların sertlik değişimi, c) Inconel-718 yüzeyinde, Ramor-500 kaplama malzemesi ile Farklı şartlarda yapılan kaplamaların sertlik değişimi.

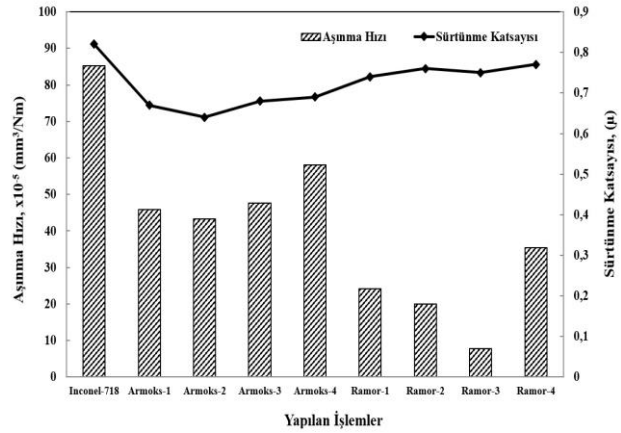
3.2 Tabaka Kalınlığı ve Sertlik Özellikleri

ESD ile üretilen kaplamaların kalınlıkları Şekil 4a'da verilmiştir. Inconel-718 alaşımının üzerine Armoks-500T zırh çelik kaplanan numunelerin kalınlıkları 7 µm - 24 µm arası değişmektedir. Ramor-500 Kaplanan zırh çelik kaplanan numuneler de ise elde edilen tabaka kalınlıkları 5 µm - 26 µm arasındadır. Kaplama sırasında Voltaj ve Kapasitans değerleri arttıkça kaplama kalınlığı artmaktadır. Ancak kapasitans değeri 80 µF den 120 µF ye çıkınca kaplama kırıklı olmaktadır. Hem homojen bir kaplama hem de daha az boşluksuz bir kaplama 80 Volt, 80 µF Kapasitans da yapılan Ramor-3 olan numunede elde edilmiştir. ESD ile üretilen kaplamaların ve matrislerin sertlikleri Şekil 4b ve Şekil 4c'de verilmiştir. Inconel-718

alaşımın üzerine yapılan kaplamalar ile birlikte yüzey sertliğini artmıştır. Farklı şartlarda ESD ile Ramor-500 zırh çeliği kaplanmış numunelerin sertliği 620 HV_{0.1} kadar çıkarken Farklı şartlarda ESD ile Armoks-500T zırh çeliği kaplanmış numunelerin sertliği 580 HV_{0.1}'dir (Kara ve Korkut 2012, Kaçar ve Emre 2018, Taşkaya ve Gür 2019, Gür vd. 2019). Kaplama tabakasında sertlikler yüksek iken matrise geçildiğinde sertlik değerleri birden düşmüştür. İşlemsiz Inconel-718 alaşımın sertliği 278 HV_{0.1}'dir. Böylece zırh çelikleri ile kaplanmış Inconel-718 alaşımının sertlik değerleri yaklaşık olarak 2-3 kat artmıştır (Kayali ve Talaş 2021).

3.3 Aşınma Karakterizasyonu

ESD yöntemiyle Inconel-718 alaşım üzerine farklı şartlarda Armoks-500T ve Ramor-500 zırh çelikleri ile kaplanan ve herhangi bir işlem görmemiş Inconel-718 alaşımının aşınma deneyleri sonucunda elde edilen aşınma hızı, sürtünme katsayısı değerleri ve aşınma derinliği Şekil 5'de ve Çizelge 4'de verilmiştir.



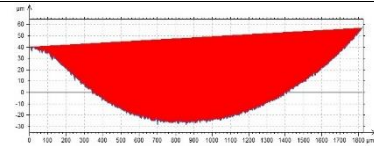
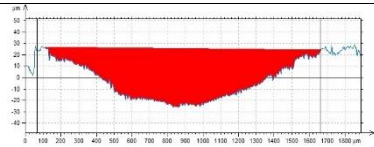
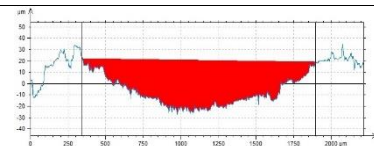
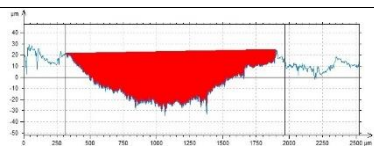
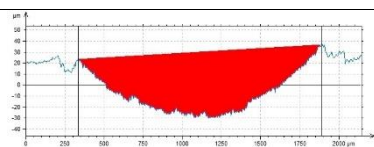
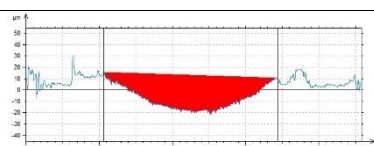
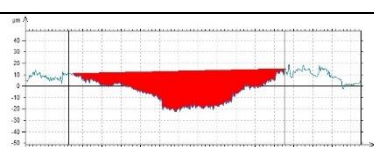
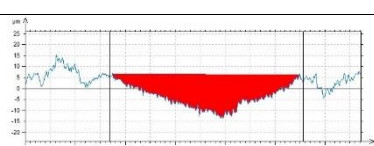
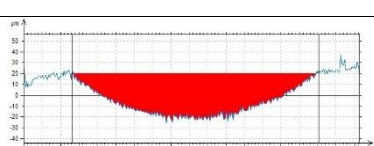
Şekil 5. Farklı Şartlarda ESD ile Armoks-500T ve Ramor-500 Zırh Çeliği Kaplanmış Inconel-718 Alaşımının Aşınma Hızı ve Sürtünme Katsayısı değerleri.

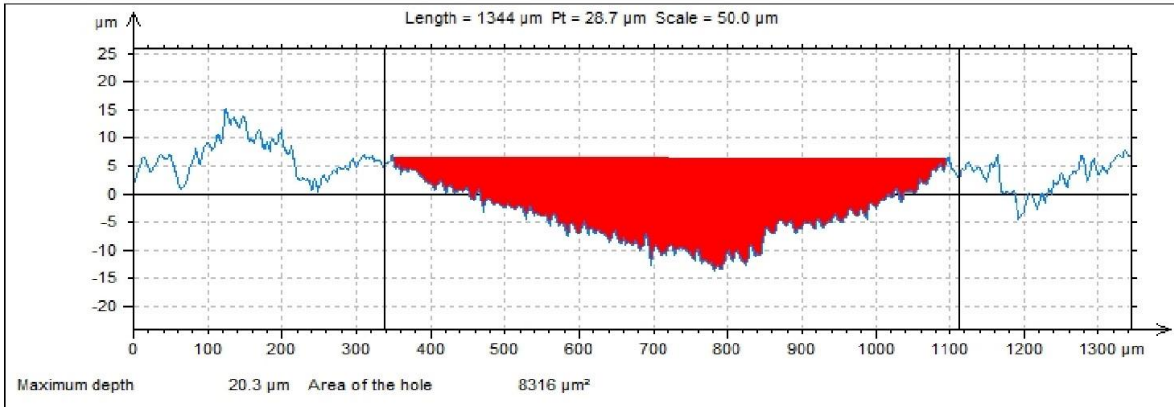
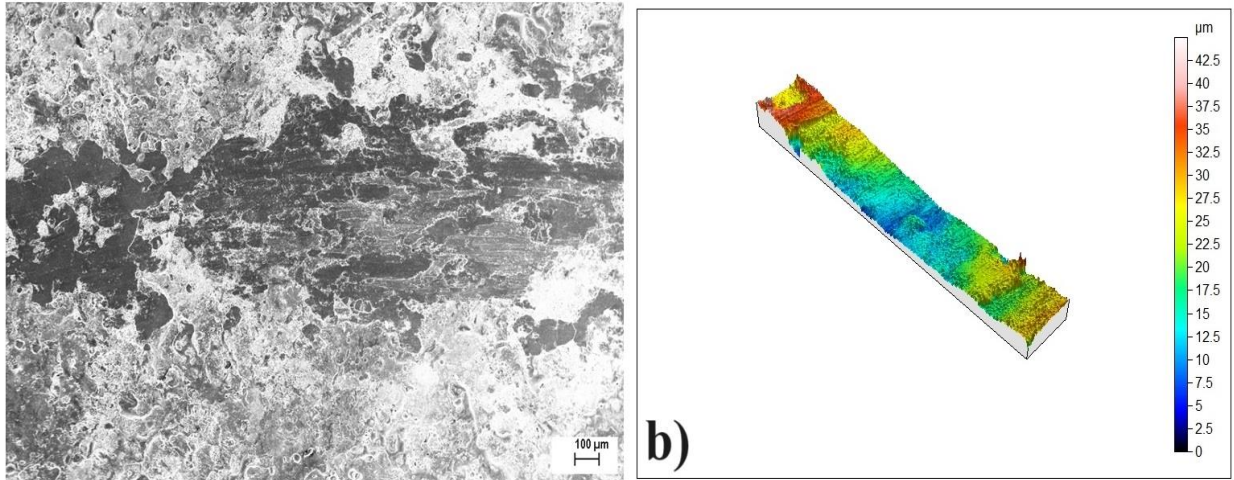
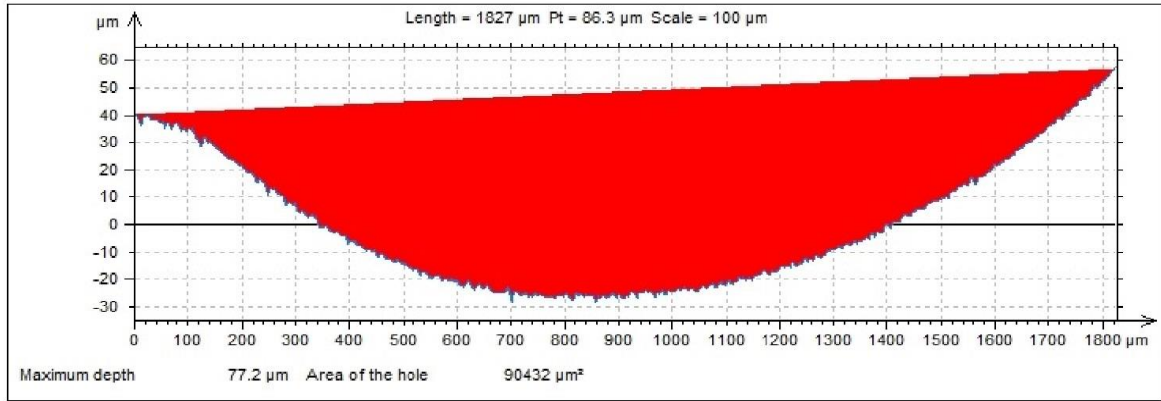
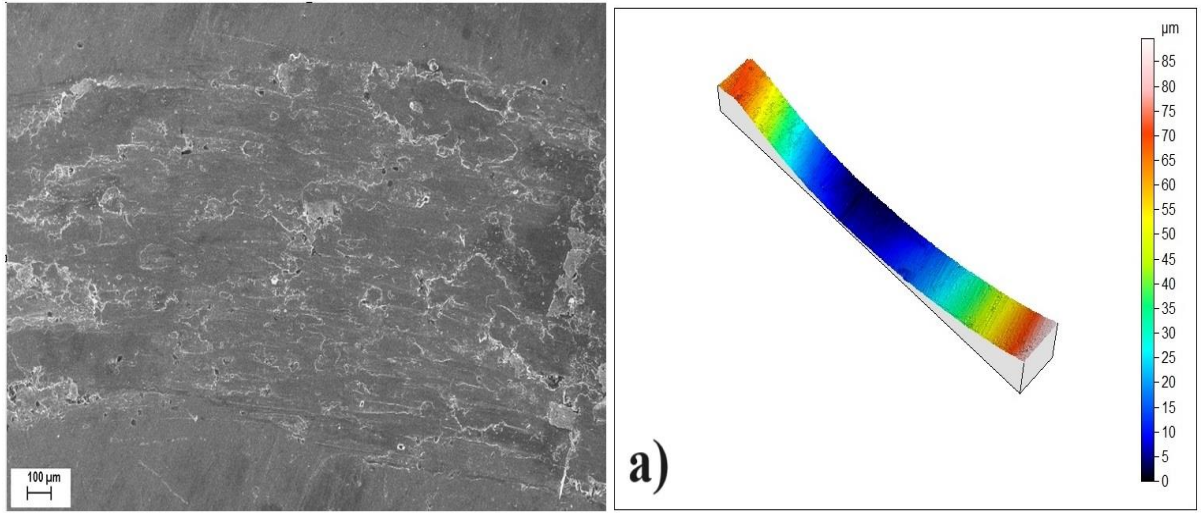
İşlemsiz Inconel-718 alaşımın sürtünme katsayısı 0,82 iken kaplama şartlarına ve kaplama malzemesine bağlı olarak 0,64-0,77 arasında değişmektedir. Sürtünme katsayısına etki eden ön önemli faktör kaplama tabakasının yüzeyinin homojenliğidir. İşlemsiz Inconel-718 alaşımın aşınma hızı 85,187x10⁻⁵ mm³/Nm iken ESD ile farklı şartlarda zırh çeliklerin kaplanması ile aşınma hızında yaklaşık olarak en az 1,5 ile 11 kat azalma görülmüştür. Kaplanmış malzemeler arasında sadece Armoks-4 numunede aşınma hızı 1,5 kat azalmıştır. Bu ise kaplama şartlarının 80V-120µF-500 Hz olmasıyla birlikte kaplamanın kırık olması ve homojen bir yapının olmamasından olabilir. En iyi aşınma direnci 80V-80µF-500 Hz ESD şartlarında yapılan Ramor-3 numunesinde 7,834x10⁻⁵ mm³/Nm elde edilmiştir. SEM resimlerine baktığımızda daha düz ve boşluksuz bir kaplama elde edilmesi sonucunda ile

Ramor-3 numunesinde aşınma hızı yaklaşık olarak 11 kat azalmıştır. Ramor-500 zırh çeliklerinin sertlik değeri yaklaşık olarak 590 HV_{0.1} iken Armoks-500T zırh çeliklerinin sertlik değeri 560 HV_{0.1} civarındadır. Ramor-500 zırh çeliklerinin sertlik değerleri daha fazla olduğu için

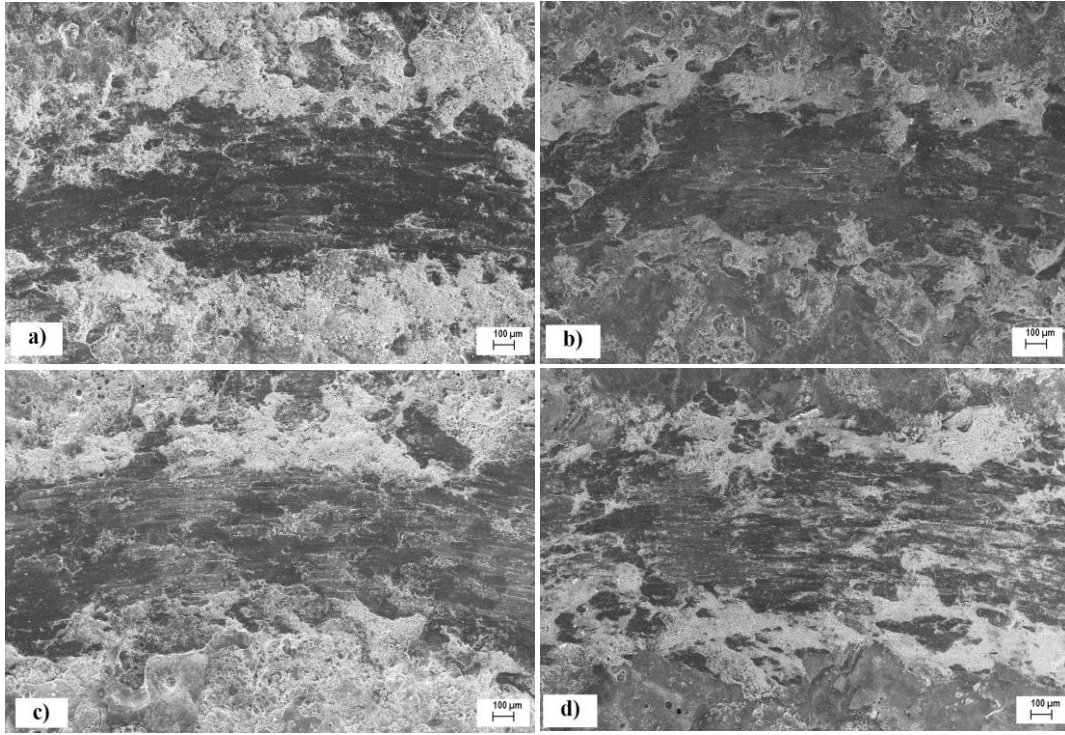
aşınma değerleri kaplamanın yapısına göre $35,396 \times 10^{-5}$ mm³/Nm ile $7,835 \times 10^{-5}$ mm³/Nm arasında değişmektedir. Armoks-500T zırh çeliğinin aşınma hızı ise kaplama yapısına göre $58,006 \times 10^{-5}$ mm³/Nm ile $45,81 \times 10^{-5}$ mm³/Nm arasında değişmektedir.

Çizelge 4. Farklı Şartlarda ESD ile Armoks-500T ve Ramor-500 Zırh Çeliği Kaplanmış Inconel-718 Alaşımının aşınma değerleri.

İşlemler	Aşınma Hızı $\times 10^{-5}$ (mm ³ /Nm)	Sürtünme Katsayısı (μ)	Aşınma Alanı (μm^2)	Aşınma Derinliği (μm)
Inconel-718	85,187	0,82	90432	
Armoks-1	45,81	0,67	48631	
Armoks-2	43,314	0,64	45981	
Armoks-3	47,62	0,68	50551	
Armoks-4	58,006	0,69	61577	
Ramor-1	24,15	0,74	25637	
Ramor-2	19,982	0,76	21213	
Ramor-3	7,834	0,75	8316	
Ramor-4	35,396	0,77	37575	



Şekil 6. a) İşlemsiz b) Ramor-3 kaplanmış Inconel-718 alaşımının Aşınma İzi ve Yüzey Profilometre İzi.

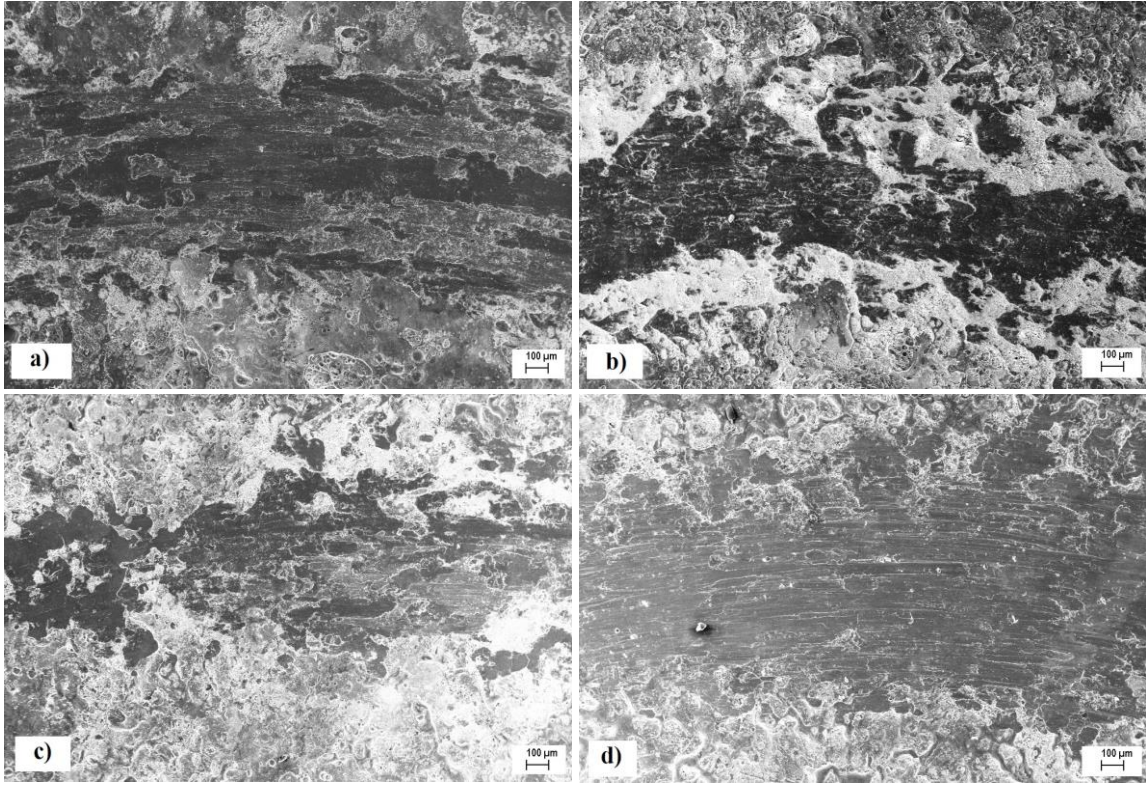


Şekil 7. Farklı şartlarda a) Armoks-1, b) Armoks-2, c) Armoks-3 ve d) Armoks-4 ile kaplanmış Inconel-718 alaşımın Aşınma İzi

Şekil 6'da En iyi ve En kötü aşınma hızı değerine sahip olan numunelerin, aşınma deneyleri sonrasında yapılan aşınma izi SEM fotoğrafları ile üç boyutlu yüzey profilometre ile aşınma izi topografyası verilmiştir. Buna göre işlemsiz Inconel-718 alaşımın aşınma izi derinliği 77,2 µm iken, Ramor-3 kaplanan numuneden aşınma derinliği 20,3 µm olarak tespit edilmiştir. Ramor-3'de elde edilen tabaka kalınlığı 21 µm olduğu için aşınmanın altlığa geçmediği ve tabakada kaldığı için aşınma hızının düşük olduğunu bize göstermektedir. Inconel-718 alaşımı üzerine yapılan Armoks-500T zırh çelik kaplamalar arasında ısıl genleşme katsayıları çok farklı olduğundan kaplama-matris ara yüzlerinde tam olarak yapışma olmadığı için mikro çatlaklar meydana gelir. Meydana gelen bu çatlaklar, mekanik zorlanma altında pul pul dökülmelere ve katmanların delaminasyonuna sebep olarak parçalanmış kaplamalar, aşındırıcı top ile alt tabaka arasına girerek aşınma hızını artırır (Allaoui vd. 2006, Edgar vd. 2016). Buna ek olarak, döngüsel yükler altında bulunan gerilimler tarafından üretilen yorulmanın bir sonucu olarak da mikro çatlaklar oluşur. Bu çatlakların zamanla ilerlemesiyle birlikte aşırı plastik deformasyonlar ve kırılma hasarları meydana gelir. Bu da delaminasyonların artmasına ve numunenin sürtünme katsayısının, aşınma hızının artışa neden olur (Aichholz vd. 2018, Krelling vd. 2017). Bu sebepten dolayı sürtünme katsayısı değerlerinin ve aşınma oranının arttığı düşünülmektedir. Şekil 7 ve Şekil 8'de, Inconel-718 alaşım üzerine ESD yöntemiyle farklı şartlarda Armoks-500T ve Ramor-500 zırh çeliği kaplanan numunelerin WC-Co

bilyeye karşı kayma aşınma testinden sonucunda elde edilen aşınma izlerinin SEM resimlerini göstermektedir. Şekil 6a'deki Aşınma izi görüntülerinde görüldüğü gibi aşınma oranı değeri en yüksek olan Inconel-718 alaşımında adhesiv aşınma mekanizmasının, delaminasyonların ve aşınma birikintilerinin etkisi nedeniyle aşınma izinde birkaç plastik deformasyon meydana geldiği görülmektedir (Kayalı ve Talaş 2019). Ayrıca Şekil 6a'da aşınma sırasında numuneden kopan aşınma kalıntıları da görülmektedir. Armoks-1 ve Armoks-2 kodlu numunelerde adhesiv aşınma mekanizması gerçekleşirken (Şekil 7a-b), Armoks-3 ve Armoks-4 kodlu numunelerde abrasif mekanizması olduğu abrasif çizikler mevcuttur. Bunun nedeni pürüzlü kaplama tabakasının aşınma sırasında basınç nedeniyle kopması ve bilye ile altlık arasına girerek abrasif çizikleri oluşturmuş olabilir (Şekil 7c-d). Armoks-500T kaplı numuneler de, aşınma süreci ve sürtünme yükünden dolayı aşınma izlerinde çatlaklar, delaminasyonlar, aşınma döküntüleri ve yüksek miktarda plastik deformasyonlar görülmüştür (Şekil 7).

En yüksek aşınma direncine sahip olan Ramor-3 kodlu numunenin aşınma izi incelendiğinde adhesiv aşınma izleri görülmektedir. Kaplama tabakasının homojen ve gözeneksiz olduğu için daha az delaminasyon ve plastik deformasyon olması nedeniyle daha az aşındığı görülmektedir (Şekil 8c). Ramor-4 kodlu numunenin kaplama tabakası kırık olduğu için (bkz. Şekil 3d) aşınma sırasında aşındırıcı bilye arasına girerek abrasif aşınma mekanizmasının en önemli ispatı olan abrasif çizikleri aşınma izinde görülmektedir (Şekil 8d).



Şekil 8. Farklı şartlarda a) Ramor-1, b) Ramor-2, c) Ramor-3 ve d) Ramor-4 ile kaplanmış Inconel-718 alaşımın aşınma izi

4. Sonuçlar

Bu çalışmadan aşağıdaki sonuçlar çıkarılabilir:

- Inconel-718 alaşımın yüzeyinde ESD yöntemiyle Armoks-500T ve Ramor-500 Zırh çelikleri başarılı bir şekilde kaplanmıştır.
- 40V dan 80 V a artıka tabaka kalınlığı artarken 40 µF kapasitansdan 80 µF kapasitans arttıkaça hem kaplama kalınlığı artmıştır hem de tabaka homojen ve gözeneksizdir. Ancak kapasitans değeri 120 µF çıkınca tabakada kırıkların ve boşlukların arttığı görülmektedir.
- 40V dan 80 V a artıka tabaka kalınlığı artarken 40 µF kapasitansdan 80 µF kapasitans arttıkaça hem kaplama kalınlığı artmıştır hem de tabaka homojen ve gözeneksizdir. Ancak kapasitans değeri 120 µF çıkınca tabakada kırıkların ve boşlukların arttığı görülmektedir.
- Inconel-718 alaşım yüzeyine farklı şartlarda Armoks-500T kaplanması sonucunda yüzeyde 7 µm' dan 24 µm kadar kaplama tabakası elde edilirken farklı şartlarda Ramor-500 kaplanması sonucunda yüzeyde 5 µm' dan 26 µm kadar kaplama tabakası elde edilmiştir.
- İşlemsiz Inconel-718 alaşımın sertliği 278 HV_{0,1} iken Her iki zırh çelikleri ile kaplanmış Inconel-718 alaşımının yüzey sertlik değerleri yaklaşık olarak 2-3 kat artmıştır.

- İşlemsiz Inconel-718 alaşımın aşınma izi derinliği 77,2 µm iken, Ramor-3 kaplanan numuneden aşınma derinliği 20,3 µm olarak tespit edilmiştir. Ramor-3 zırh çeliği kaplı numuneler de aşınma tabakada kalmıştır.
- Inconel-718 alaşımın aşınma dirençleri hem Armoks-500T hem de Ramor-500 zırh çelikleri kaplamalarında 1,5-11 kata kadar iyileştirilmiştir. En iyi aşınma direnci Ramor-3 kodlu numune $7,834 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{Nm}'\text{dir}$.

Etik Standartlar Bildirgesi

Yazarlar tüm etik standartlara uyduklarını beyan ederler.

Yazarlık Katkı Beyanı

Yazar-1: Araştırma, Fikir Sahibi, Deney tasarımı, Proje Yöneticisi, Görselleştirme, Yazma-rijinal taslak

Yazar-2: Kaynaklar, Deney

Çıkar Çatışması Beyanı/Declaration of Competing Interest

Yazarların bu makalenin içeriğiyle ilgili olarak beyan edecekleri hiçbir çıkar çatışması yoktur.

Verilerin Kullanılabilirliği/ Data Availability

Bu çalışma sırasında oluşturulan veya analiz edilen tüm veriler, yayınlanan bu makaleye dahil edilmiştir.

Teşekkür

Bu araştırma Afyon Kocatepe Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü tarafından desteklenmiştir (Proje No: AKU BAPK-21. FEN. BİL.14).

5. Kaynaklar

- Abad, M.D., Muñoz-Márquez, M.A., El Mrabet, S., Justo, A., Sánchez-López, J.C., 2010. Tailored synthesis of nanostructured WC/TaC coatings by dual magnetron sputtering. *Surface & Coatings Technology*, **204**, 3490-3500.
<https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2010.04.019>
- Aichholz S.A.C., Meruvia M.S., Júnior P.C.S., Torres R.D., 2018. Tribocorrosion behavior of boronized AISI 4140 steel. *Surface & Coatings Technology*, **352**, 265-272.
<https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2018.07.101>
- Allaoui O., Bouaouadja N., Saindennan G., 2006. Characterization of boronized layers on a XC38 steel. *Surface & Coatings Technology*, **201**, 3475-3482.
<https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2006.07.238>
- American Welding Society, 2007. *Welding Handbook*, Vol. **3**, 9th Ed., Miami, FL, 598-602.
- Bhattacharya S.K., Javaid A., Lewis M.H., Walbank J., 1983. Wear Mechanisms of Syalon Ceramic Tools when Machining Nickel-Based Material. *Metals Technology*, **10**, 482-483.
<https://doi.org/10.1179/030716983803291415>
- Edgar E.V.C., Roger L., Armando I.M.P., Jose L.B.P., Francisco J.P.P., Martin O.D., Eduardo D.R.A., 2016. Characterization and wear performance of boride phases over tool steel substrates. *Advances in Mechanical Engineering*, **8(2)**, 1-10.
<https://doi.org/10.1177/1687814016630257>
- Günen, A., Kanca, E., Çakır, H., Karakaş, M. S., Gök, M.S., Küçük, Y., Demir, M., 2017. Effect of borotitanizing on microstructure and wear behavior of Inconel 625. *Surface & Coatings Technology*, **311**, 374-382.
<https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2016.12.097>
- Gür, A.K., Taşkaya, S., Özay, Ç., 2019. Ramor-500 Çeliğinde Isıl İşlemin Mikroyapı, Mikrosertlik ve Abrasiv Aşınma Direncine Etkisinin Taguchi Metoduyla Değerlendirilmesi. *BEU Journal of Science*, **8(3)**, 1045-1056.
<https://doi.org/10.17798/bitlisfen.532073>
- Jindal, P.C., Quinto, D.T., Wolfe, G.J., 1987. Adhesion measurements of chemically vapor deposited and physically vapor deposited hard coatings on WC/Co substrates. *Thin Solid Films*, **154**, 361-375.
[https://doi.org/10.1016/0040-6090\(87\)90379-8](https://doi.org/10.1016/0040-6090(87)90379-8)
- Kaçar, R., Emre, Ertek H., 2018. Gaz Metal Kaynaklı Zırh Çeliklerinin Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi. *AKU J.Eng.App.Sci.* **Vol.1**, 15-23.
- Kara, S., Korkut, M.H., 2012. Zırhlı Muharabe Araçlarında Kullanılan Zırh Plakalarında Kaynak Sonrası Isıl İşlemin Birleşim Mukavemetine Etkisinin Araştırılması. *The Journal of Defense Sciences*, **11(2)**, 159-171.
<https://doi.org/10.17134/sbd.44699>
- Kayali, Y. and Talaş, Ş., 2019. Investigation of Wear and Corrosion Behaviour of AISI 316 L Stainless Steel Coated by ESD Surface Modification. *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*, **55**, 1148-1153.
<https://doi.org/10.1134/S2070205119060170>
- Kayali, Y. and Talaş, Ş., 2021. Investigation on Wear Behavior of Steels Coated with WC by ESD Technique. *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*, **57**, 1065-112.
<https://doi.org/10.1134/S2070205120060131>
- Krelling A.P., Da Costa C.E., Milan J.C.G., Almeida E.A.S., 2017. Micro-abrasive wear mechanisms of borided AISI 1020 steel. *Tribology International*, **111**, 234-242.
<https://doi.org/10.1016/j.triboint.2017.03.017>
- Kurzynowski, T., Smolina, I., Kobiela, K., Kuz'nicka, B., Chlebus, E., 2017. Wear and corrosion behaviour of Inconel 718 laser surface alloyed with rhenium. *Materials and Design*, **132**, 349-359.
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.07.024>
- Rastkerdar, E., Aghajani, H., Kianvash, A., Sorell, C.C., 2018. Microstructural characterization of AA5183 aluminum clad AISI 1018 steel prepared by electro spark deposition. *Mater. Res. Express*, **5 (4)**, 046507.
<https://doi.org/10.1088/2053-1591/aab81f>
- Shepeleva, L., Medres, B., Kaplan, W.D., Bamberger, M., Weisheit, A., 2000. Laser cladding of turbine blades. *Surface & Coatings Technology*, **125**, 45-48.
[https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(99\)00603-9](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(99)00603-9)
- Tang, J., 2016. Mechanical and Tribological properties of the TiC-TiB₂ composite coating deposited on 40Cr-steel by electro spark deposition. *Applied Surface Science*, **365**, 202-208.
<https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2015.12.198>
- Taşkaya, S., Gür, A.K., 2019. Ramor 500 Zırh Çeliğinin Tozaltı Kaynak Yöntemi ile Birleştirilmesinde Tel İlerleme Hızının Kaynak Metalindeki Nüfuziyet Dengesinin İncelenmesi. *GÜFBED*, **9(3)**, 444-453.
<https://doi.org/10.17714/gumusfenbil.426195>
- Zhu, Y.C., Yukimura, K., Ding, C.X., Zhang, P.Y., 2001. Tribological properties of nanostructured and conventional WC-Co coatings deposited by plasma spraying. *Thin Solid Films*, **388**, 277-282.
[https://doi.org/10.1016/S0040-6090\(01\)00805-7](https://doi.org/10.1016/S0040-6090(01)00805-7)

İnternet Kaynakları

- 1-Inconel 718 (Alloy 718, UNS N07718, 2.4668)
<https://bircelik.com/tr/kategori/inconel-718>, (26.04.2024)