

T.C.
GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ
MÜHENDİSLİK ve FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÇELİK YÜZEYLERİN ELEKTROSPARK ALAŞIMLAMA
YÖNTEMİ KULLANILARAK KROMKARBÜR-NİKELKROM İLE
KAPLANMASI

HÜSEYİN TOPAÇ
YÜKSEK LİSANS TEZİ
MALZEME BİLİMİ ve MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

GEBZE
2014

T.C.
GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ
MÜHENDİSLİK ve FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÇELİK YÜZEYLERİN ELEKTROSPARK
ALAŞIMLAMA YÖNTEMİ KULLANILARAK
KROMKARBÜR-NİKELKROM İLE KAPLANMASI

HÜSEYİN TOPAÇ
YÜKSEK LİSANS TEZİ
MALZEME BİLİMİ ve MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMANI
YRD.DOÇ. DR. KEMAL KORKMAZ

GEBZE
2014



**GEBZE YÜKSEK
TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS JÜRİ ONAY FORMU

GYTE Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 02/06/2014 tarih ve 2014/34 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 10.07.2014 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Hüseyin TOPAÇ'ın tez çalışması Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE

(TEZ DANIŞMANI) : Yrd.Doç.Dr.Kemal KORKMAZ

ÜYE

: Prof.Dr.Metin USTA

ÜYE

: Yrd.Doç.Dr.Sinan KAZAN

ONAY

GYTE Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun tarih ve/..... sayılı kararı.

İMZA/MÜHÜR

ÖZET

Electro-Spark Alaşımlama yöntemi metalik yüzeylerde sert ve aşınmaya dayanıklı bir kaplama üretmede gelecek vaat eden bir yöntemdir. Electro-Spark Alaşımlama metodu, metalik malzemelerin yüzeylerine geleneksel yöntemlere kıyasla çok daha kuvvetli olarak bağlanan ve iyi bir yapışma sergileyen kaplamalar yapılmasını sağlayan, kullanılan elektrodun darbeli (pulse) elektrik akımlarının oluşturduğu plazma formasyonu vasıtasıyla yüzeyde biriktirilmesi prensibine dayanan bir mikro-kaynak işlemidir.

Bu çalışmada çelik numunelere Electro-Spark Alaşımlama tekniği kullanılarak kromkarbür-nikelkrom ($\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$) kaplama yapılmıştır. Electro-Spark Alaşımlama yönteminde prosesin uygun parametreleri belirlendikten sonra oluşturulan kaplama yüzeyleri incelenmiştir. Oluşan mikroyapı ve fazlar X-ışını difraksiyonu (XRD) ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile karakterize edilmiştir. Ortalama 20 μm kalınlığa sahip tam olarak yoğun ve kuvvetli bir yapışkan kaplama tabakası elde edilmiştir.

Buna ek olarak, kaplama ve alt tabakaların sürtünme ve aşınma özellikleri, aşınma testleriyle sistematik olarak incelenmiştir. Deneysel sonuçlar Electro-Spark Alaşımlama işlemi yoluyla çelik altlıkta biriken bir $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ kaplama varlığını ve kaplamanın aşınma direnci ve sürtünme katsayısını belirgin bir şekilde geliştirmiş olduğunu göstermektedir. Ayrıca altlık kısmın sertlik değeri ortalama 298 HV iken, kaplamanın yüzeyinde sertlik 1613 HV'ye ulaşmıştır.

Anahtar Kelimeler: Electro-Spark Alaşımlama(ESA), KromKarbür NikelKrom ($\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$), Mikro - Sertlik, Aşınma Direnci.

SUMMARY

Electrospark deposition (ESD) method is a promising process to produce hard and wear-resistant coatings on metallic substrates. ESD is a micro welding process applied by an electrode using pulsed electric currents, thus depositing coating material on the surface of the substrate. It ensures a metallurgically bonded and stronger coating layer than any conventional technique.

In this study, ESD has been successfully applied to deposit $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ on steel substrate. Electro-Spark Alloying method of determining the appropriate parameters in the process created after the surfaces have been investigated. The microstructures of the deposited coatings were characterized by X-ray diffraction (XRD) and scanning electron microscopy. It has been possible to obtain a fully dense and strong adherent coating layer with a thickness of 20 μm .

In addition, the friction and wear properties of the coatings and substrates were investigated systematically by conducting tests. The experimental results demonstrate that the wear resistance of the steel substrate, which contains a $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ coating deposited via the ESD process, is noticeably enhanced under the dry sliding wear conditions. In addition, while the microhardness of substrate is 298 HV on average, the microhardness of the coating reaches 1613 HV onto the surface.

Key Words: Electro-Spark Deposition (ESD), $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$, Micro-Hardness, Wear-Resistant.

TEŞEKKÜR

Başta, yüksek lisans eğitimimde desteğini ve yardımlarını hiçbir zaman esirgemeyip bilgisi ve tecrübesi ile bu çalışmanın oluşmasının yolunu açan danışmanım Yrd. Doç. Dr. Kemal KORKMAZ'a, ve laboratuvar çalışmalarındaki katkılarından dolayı Uzman teknisyen Ahmet NAZIM ve Adem ŞEN'e tüm içtenliğimle teşekkürü bir borç bilirim.

Bütün çalışmam boyunca yanımda olan, bilgi ve tecrübelerini benimle paylaşan değerli arkadaşım Araştırma Görevlisi Ali ÇAKIR'a, Araştırma Görevlisi Salih DURU 'ya, Metalurji ve Malzeme Mühendisi Serhan KOÇYİĞİT'e

Ve göstermiş olduğu desteklerinden dolayı sevgili aileme en içten teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	iv
SUMMARY	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER	vii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
TABLolar DİZİNİ	xi
1. GİRİŞ	1
1.1. Tezin Amacı, Katkısı ve İçeriği	2
2. ELEKTROSPARK ALAŞIMLAMA YÖNTEMİ	5
2.1. Elektro-Spark Alaşımlama Yönteminin Gelişim Süreci	5
2.2. Elektro-Spark Sistemi Ve Uygulanması	6
2.3. Elektro-Spark Alaşımlama İşlemi ve Karakteristikleri	9
2.4. Elektro-Spark Alaşımlama Yönteminin Avantaj ve Dezavantajları	11
2.5. Elektro-Spark Alaşımlama Yönteminin Kullanım Alanları	12
3. DENEYSEL UYGULAMA ve BULGULAR	15
3.1. Kaplama Numunelerinin Hazırlanması	15
3.2. Numunelerin Karakterizasyonu	16
3.3. ESD Metoduyla Kaplama İşlemi	17
3.4. ESD Metoduyla Kaplama İşleminde Ağırlık Artışı	20
3.5. ESD Metoduyla Kaplama İşleminde XRD Sonuçları	22
3.6. Kaplamaların SEM ve EDX Analizleri	26
3.7. Kaplamaların Mikro Sertlik Sonuçları	35
3.8. Kaplamaların Sürtünme Katsayıları Ve Aşınma Miktarları	37
4. SONUÇLAR ve YORUMLAR	41
KAYNAKLAR	44
ÖZGEÇMİŞ	49

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler ve Açıklamalar

Kisaltmalar

ESD	: Electro-Spark Deposition (Electro-Spark Alaşımlama)
EDX	: Energydispersive X-Ray Spectroscopy (Enerji Dağılımlı X-Işını Spektroskopisi)
HAZ	: Heat Affected Zone(Isıl yüklere maruz kalmış bölge)
IEG	: Inter Electrode Gap(Elektrotlar arasında spark discharge ın olduğu boşluk)
SEM	: Scanning-Electron Microscopy (Taramalı Elektron Mikroskobu)
XRD	: X-Ray Diffraction (X-Işınları Kırınımı)

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil No:</u>	<u>Sayfa</u>
2.1: ESD sistemi şeması.	7
2.2: ESD kaplama sisteminde malzeme transferinin şematik bir gösterimi.	8
3.1: ESD yönteminde kullanılan 10x10x10 mm'lik St37 çelik altlık numune.	15
3.2: ESD işleminde uygulanan akım zaman grafiği.	19
3.3: Dikdörtgen impulse formundaki, 100A(100µs, 200µs, 300µs) sürelerde darbelerin(pulse) uygulanması ile elde edilen ağırlık artışlarının kaplama sayısına (paso) göre değişimi.	21
3.4: Dikdörtgen impulse formundaki, 100A(100µs, 200µs, 300µs) sürelerde darbelerin (pulse) uygulanması ile elde edilen kaplama kalınlığının kaplama sayısına (paso) göre değişimi.	21
3.5: Kaplamasız Çelik altlık numunenin X-Ray grafiği.	23
3.6: ESD kullanılan KromKarbür-NikelKrom elektrotların X-Ray grafiği.	24
3.7: ESD Kaplı numunenin X-Ray grafiği.	25
3.8: ESD tekniğiyle Cr ₃ C ₂ -NiCr kaplanmış olan numunenin SEM ile alınmış yüzey morfolojisi görüntüsü.	26
3.9: ESD tekniğiyle Cr ₃ C ₂ -NiCr kaplanmış olan numunenin SEM ile alınmış yüzey morfolojisi görüntüsü.	27
3.10: ESD tekniğiyle Cr ₃ C ₂ -NiCr kaplanmış olan numunenin SEM ile alınmış yüzey morfolojisi görüntüsü.(Yüzeydeki saçılmaların (splash) üst üste bindiği görülüyor.)	27
3.11: ESD yöntemi kullanılarak çelik üzerine yapılmış Cr ₃ C ₂ -NiCr kaplamanın yan-kesit görüntüsü.	28
3.12: ESD yöntemi kullanılarak çelik üzerine yapılmış Cr ₃ C ₂ -NiCr kaplamanın EDX analizi için alınan Yüzey SEM görüntüsü (Area7 Full Area1).	29
3.13: ESD tekniğiyle Cr ₃ C ₂ -NiCr kaplanmış olan numunenin SEM/EDX analizi (Area7 Full Area1).	29
3.14: ESD yöntemi kullanılarak çelik üzerine alaşımlanmış Cr ₃ C ₂ -NiCr kaplanmış numunenin EDX analizi için alınan yan kesit SEM görüntüsü.	30

3.15:	ESD tekniğiyle Cr ₃ C ₂ -NiCr kaplanmış olan numunenin SEM/EDX analizi (Area2) - St37 elik altlık.	31
3.16:	ESD tekniğiyle Cr ₃ C ₂ -NiCr kaplanmış olan numunenin SEM/EDX analizi (Area1) - Cr ₃ C ₂ -NiCr Kaplama.	32
3.17:	ESD yöntemiyle a) Cr ₃ C ₂ -NiCr kaplı numunenin, b) grafiksel Line-EDX görüntüsü.	33
3.18:	ESD yöntemiyle Cr ₃ C ₂ -NiCr kaplı numunenin kaplama kalınlıkları.	34
3.19:	ESD yöntemiyle Cr ₃ C ₂ -NiCr kaplı çeliğin sertlik ölçüm değerleri.	35
3.20:	ESD yöntemiyle Cr ₃ C ₂ -NiCr kaplı çelikten elde edilen sertlik izleri	36
3.21:	ESD yöntemiyle Cr ₃ C ₂ -NiCr kaplanmış olan elik için sertlik-mesafe değişim grafiği.	36
3.22:	ESD yöntemiyle Cr ₃ C ₂ -NiCr kaplı numunenin altlık sürtünme katsayı grafiği.	37
3.23:	ESD yöntemiyle Cr ₃ C ₂ -NiCr kaplı numunenin kaplama bölgesi sürtünme katsayı grafiği.	38
3.24:	ESD yöntemiyle Cr ₃ C ₂ -NiCr kaplı numunenin altlık ve kaplamanın sürtünme katsayısı değişim grafikleri.	38
3.25:	ESD yöntemiyle Cr ₃ C ₂ -NiCr kaplı numunenin altlık ve kaplamanın aşınma miktarındaki değişim grafikleri.	39
3.26:	ESD yöntemiyle Cr ₃ C ₂ -NiCr kaplı numunenin a) altlık ve b) kaplamanın aşınma davranışları.	40

TABLÖLAR DİZİNİ

<u>Tablo No:</u>	<u>Sayfa</u>
3.1: St37 çeliğinin kimyasal kompozisyonu.	15
3.2: ESD yöntemiyle kaplama deneylerinde kullanılan darbe (pulse) paketleri.	20
3.3: Altlık, Elektrotlar ve Kaplanmış numunelerin X-Ray Analizi Sonuçları.	22
3.4: ESD tekniğiyle Cr3C2-NiCr kaplanmış olan numunenin SEM/EDX Analizi Oransal Sonuçları.	30
3.5: ESD tekniğiyle Cr3C2-NiCr kaplanmış olan numunenin Yan Kesitten Altlık SEM/EDX Analizi Oransal Sonuçları.	31
3.6: ESD tekniğiyle Cr3C2-NiCr kaplanmış olan numunenin Yan Kesitten Kaplama SEM/EDX Analizi Oransal Sonuçları.	32
3.7: ESD yöntemiyle Cr3C2-NiCr kaplı çeliğin sertlik değerleri.	36
3.8: ESD yöntemiyle Cr3C2-NiCr kaplı numunenin sürtünme katsayıları ve aşınma miktarları.	39

1. GİRİŞ

Günümüzde mühendislik malzemesi ihtiyaçlarını karşılayabilmenin en iyi yollarından biri sertlik, aşınma direnci, yüksek sıcaklık mukavemeti ve korozyon direnci gibi özelliklerin geliştirilmesine olanak veren yüzey kaplama uygulamalarıdır. Makine, cihaz ve mekanizmalara ait parçaların çalışması incelendiğinde, büyük çoğunluğunda bunların sadece yüzeylerinin genelde çalıştığını ve bu nedenle en çok bu yüzeylerin yıprandığını fark edebiliriz. Ayrıca bu yüzeylerin, amaca göre düşük veya yüksek sürtünme katsayısına sahip, makinenin çalışan bu parçasının tamamına nazaran ısıya, korozyona ve aşınmaya daha çok dayanıklı, daha sert v.s. olması gerektirdiğini görebiliriz.

Bu konuda en çok umut veren yöntemlerden biri de electro-spark biriktirme (ESD) ile kaplama yöntemidir. Electro-spark biriktirme (ESD) temel olarak kısa süreli, yüksek akım değerine sahip elektrik darbeleri (pulse) kullanılarak elektrot malzemesinin metalik bir altlık malzemenin yüzeyine alışımlanmasını (biriktirilmesini) sağlayan mikro-kaynak işlemidir. Kullanılan elektrot malzemesi elektriksel olarak iletken olmalı ve oluşan elektrik kıvılcımının (spark) etkisiyle eriyebilmelidir. Elektrik devresi tarafından sağlanan kısa süreli ve yüksek akım değerine sahip her akım sonucu oluşan kıvılcım (spark) elektrodu ertiterek altlık malzemesinin üzerine düşmesini ve bu çevrimin belirli aralıklarla tekrarlanmasıyla elektrot malzemenin altlık yüzeyine kaplanması sağlar. İşlem ark-kaynağı metoduyla oldukça benzer olmakla birlikte, elektrik darbeleri (pulse) halinde ve küçük periyotlar sonucunda oluşan toplam ısının çok az olmasıyla farklılık gösterir.

Elektro-spark biriktirme (depozisyon) prosesinde; alışımlı sağlayan malzeme (anot malzemesi), alışımlanan yüzeyin (katot yüzeyin) üzerinde yüzey ile çok sağlam bir şekilde tutunan bir kaplama tabakası oluşturmaktadır. Bu durumda alışımlama sonucu hem kaplama malzemesiyle ana malzeme arasında belirgin bir ayırıcı sınır oluşmaz ve hem de anot malzemenin esas malzemeye karışımı gerçekleşir [1].

1.1.Tezin Amacı, Katkısı ve İçeriği

Kaplama teknolojisi, bir makinenin veya teçhizatın çalışan bir komponentinin sadece yüzeyinde bir takım özellikleri değiştirmekle onun çalışma koşullarına bütünüyle uyum ve tepkisini geliştirmeyi amaçlayan geniş bir aralıktaki bir takım metotları kapsamaktadır. Aşağıdaki gibi bir ESD kaplama prosesinden de beklenen özellikler şunları içerebilir;

- Bakım maliyetlerini azaltmak,
- Yüksek çalışma sıcaklıklarında termal yükleri azaltmak,
- Aşınma, erozyon oranını azaltmak ve aşındırma direncini geliştirmek,
- Korozyon direncini arttırmak,
- Oksitlenmeyi azaltmak veya engel olmak,
- Sıcak korozyonu azaltmak veya engel olmak,
- Aşındırabilme ve boyutsal restorasyon için kullanılabilir.

Elektro-spark alایشım (depozisyon) yönteminin teknolojisi çok basit olup, bunun için gereken cihazlar ise küçük boyutlu, ağır olmayan yani bir insan için taşınabilir özelliktedir. ESD prosesinin pratikliği, ekipmanın oldukça düşük maliyette cihazlar ile kurulabilmesi, bu yöntemin endüstride kolayca geniş bir alanda kullanılmasına olanak sağlamıştır. ESD yönteminde kaplanacak yüzeye özel hazırlık gerektirmez, sadece eğer varsa yüzey yağının temizlenmesi gerekebilir. ESD için elektrik iletkenliği olan her metal, alایشım ve kompozisyon (içinde karbid, boron, bazı silikon içerenler) için kaplama yapmak mümkündür.

Ayrıca ESD prosesin teknolojisi ve teçhizatı konusunda ortaya koyulan problemlerin analizi bu teknolojinin iyileştirilmesi ve geliştirilmesinde yeni perspektifler olduğunu göstermiştir. Bu proses ortaya çıktığı günden beri, yukarıda sıraladığımız bazı özelliklerinden dolayı bilim adamlarının dikkatini çekmiş ve daha da geliştirilmesi için birçok çalışma yapılmıştır. Fakat tüm bu üstünlüklere rağmen metal yüzeylerin elektro-spark alایشım (depozisyon) prosesi, yıllarca sadece değişik aletlerin çalışan yüzeylerinin sağlamlaştırılmasında ve tamir-yenileme çalışmalarında kullanılmıştır.

Bunun nedeni, alaşım prosesinin yeterince araştırılmamış olması ve bu yöntemin makineleştirilmesi (otomatikleştirilmesi) konusunun çoğu zaman olumsuz biçimde sonuçlanması olmuştur. Günümüzde söz konusu sorunlar bilgisayar çağımızın olanakları sayesinde olumlu çözümlere kavuşmaya başladığından, yöntemin kullanım alanları da genişlemiştir. Çalışan yüzeyleri elektro-spark alaşım yöntemiyle kaplanan makine ve cihaz parçaları, gün geçtikçe daha fazla sayıda ortaya çıkmaktadır.

Bu çalışmada, Elektro-spark biriktirme (ESD) yöntemi kullanılarak çelik numuneler üzerinde krom-karbür ve nikel-krom elektrotlar ile kaplama deneyleri yapıldı. Krom karbür üç kimyasal kompozisyonda bulunabilen bir seramik bileşiktir. Bu kompozisyonlar; Cr_3C_2 , Cr_7C_3 ve $Cr_{23}C_6$ 'dır. Standart koşullarda, koyu gri renkte bir katıdır. $Cr_{23}C_6$ kübik kristal kafeste ve 10.5 GPa Vickers sertliğine sahiptir [2]. Cr_7C_3 ise ortorombik kristal kafes yapısındadır ve Vickers sertliği 14.5 GPa'dır [3]. Son olarak, Cr_3C_2 bu üç kompozisyonun en kararlısı olup, ortorombik kristal yapıda ve 23.5 GPa Vickers sertliğine sahiptir [3-5]. Bu özellikleri ile metal alaşımlarına katkı olarak ilave edilebilir. Krom karbür, bir metalin yüzeyine kaplandığında, yüzeye hem aşınma hem de korozyon direnci verir ve bu özelliğini yüksek sıcaklıklarda da sürdürür. Bu tip kaplama uygulamaları için en sert ve genelde en çok kullanılan kompozisyonu Cr_3C_2 'dir [2].

Kayuk ve ark [6], krom karbür tabanlı sert alaşımları farklı bağlayıcı faz oranlarında aşınma deneylerine tabi tutmuşlar ve artan Ni bağlayıcı faz miktarının sürtünme katsayısını düşürdüğünü belirtmişlerdir. Ayrıca bu alaşımların aşınma davranışlarını yüksek sıcaklıklarda da inceleyerek oluşan oksit tabakalarının Ni artışı ile NiO'dan $NiCr_2O_4$ şekline dönüştüğünü ve bu oksit tabakalarının da sürtünme katsayısını azaltıcı bir nevi katı yağlayıcı görevi üstlenmesi ile sürtünme katsayılarında ve aşınma hızlarında ciddi bir farklılık gözlenmediğini belirtmişlerdir.

- Cr_3C_2 -NiCr'nin Kaplama Olarak Kullanılması

Romero ve ark. [7], M2 sertleştirilmiş çelik ve Si dilimler üzerine nanometrik düzeyde Cr_3C_2 fazı kaplayarak amorf benzeri Cr_3C_2 fazı elde ettiklerini belirtmişlerdir. Kaplama kalınlığının 11 nm'lik periyodik dönüşümleri izlediğini ve farklı kalınlık periyotlarında farklı özellikler ortaya çıktığını ileri sürmüşlerdir.

Altlık malzeme sertliğinde %30'a varan artış gözlemlenmiş ve bunun karışımlar kuralına uygun şekilde Cr_3C_2 fazının varlığından ileri geldiğini söylemişlerdir.

Sidhu ve arkadaşları [8], tarafından yapılan bir çalışmada, yüksek hızlı oksijen akışı tekniği (HVOF) ile Ni alaşımlarının yüzeyi Cr_3C_2 -NiCr kaplanarak, bu alaşımlarının sülfat tuzlarına karşı yüksek sıcaklık korozyon direncinde önemli artış olduğu ortaya çıkarılmıştır.

Yaptıkları mikrosertlik analizlerinde kaplanan yüzeyde sertlik artışı ile korozyonla birlikte yüksek sıcaklıkta sert tozların çarpmasıyla oluşan erozyon direncinde de artış tespit etmişlerdir. Yaklaşık 100-200 μm 'lik kaplama kalınlığı ile sertliğin 350HV'den 850HV'ye çıkarılabildiğini ve 900°C gibi yüksek sıcaklıklarda bile yüzeyde oksidasyon direncinin 5 katına çıktığını ve oksitlenmeden doğan ağırlık artışında da 4 kat azalma gözlemlenmişlerdir.

Espallagras, Murthy ve Li'nin yaptığı farklı çalışmalarda, NiCr bağlayıcı metal faz içeren Cr_3C_2 ve WC sistemlerinin çelik yüzeyine HVOF ile kaplanmasıyla, eroziv korozyon özelliklerinin iyileştiğini göstermişlerdir. Farklı tavlama koşullarının farklı açılarda katı parçacık çarpması erozyonuna karşı dayanımını değiştirdiğini, bunun da metal bağlayıcı faz miktarına bağlı olduğunu, kaplama fazının farklılığına göre oksitlenme direncinde de artış sağlandığını bildirmişlerdir [9-11]. Magnani ve ark. da yaptıkları çalışmada, alüminyum alaşım üzerine HVOF ile kaplanan Cr_3C_2 -NiCr kaplamanın, alaşımın tuz çözeltilerine karşı direncinin çok iyileştiğini; elektrokimyasal empedans spektroskopisi, açık devre potansiyel ölçümleri ve potansiyodinamik polarizasyon eğrileri ile belirlemişlerdir [12].

Bu çalışmada numuneler üzerinde daha kalın, üniform ve daha kaliteli kaplama tabakası elde etmek amacıyla ESD prosesin elektrik parametreleri incelendi ve prosesin daha efektif kullanılması için gerekli şartlar araştırıldı. En uygun şartlar tespit edilip kaplama çalışmaları gerçekleştirildi. Yapılan mikrosertlik analizlerinde kaplanan yüzeyde muazzam bir sertlik artışı ile sürtünme katsayısındaki düşüşle birlikte aşınma direncinde de artış tespit edildi. Yaklaşık 15-20 μm 'lik kaplama kalınlığı ile sertliğin 452HV'den 1613HV'ye çıkarılabildiği gözlemlendi.

2. ELEKTROSPARK ALAŞIMLAMA YÖNTEMİ

2.1. Elektro-Spark Alaşımlama Yönteminin Gelişim Süreci

Eski Yunanlı filozofların sürtünmeyle oluşan elektrik yükünün boşalması (discharge) esnasında ortaya çıkan kıvılcımları gözlemlediklerinden beri elektrik-spark olayı bilinmekteydi. Genellikle "elektro-spark" teriminin kullanımı, bitişik denecek kadar birbirine yakın cisimler arasındaki potansiyel farkın kritik bir değeri aştığı zaman elektrik boşalmasının (discharge) meydana gelmesi anlamına gelmektedir ve elektro-spark'ı basitçe çok kısa süreli bir mikro-ark olayı olarak da düşünebiliriz.

Elektrik arkının yüzey özellikleri üzerindeki etkisi konusundaki en eski çalışma 1924 yılında Rawdon (U.S. Bureau of Standards) tarafından yapılmıştır. Rawdon, demir üzerine benzer bir elektrot kullanılarak ark uygulanması sonucu sertliğinin oldukça arttığını keşfetmiş, daha sonra bunun sebebinin kısa süreli ark uygulaması sonucunda hızlı şekilde soğuyan demirin martenzite dönüşmesi olduğunu göstermiştir [13].

1943'te Lazarenko elektrik arklarıyla metal işleme metodları üzerinde çalışmalar yapmış ve electro-spark tekniğinin temellerini atmıştır. Elektrik arklarının metaller üzerindeki etkisinin keşfedilmesinden sonra pek çok alanda uygulanmıştır [14],[15].

1957 yılında da Welsh, çeliklerin yüzeylerinde sürtünme sonucunda oluşan ısı etkileri elektrik arkları uygulayarak simüle etmeye çalışırken Rawdon'un gözlemlediğine benzer bir fenomenle karşılaşmıştır [16]. Welsh ilerleyen çalışmalarında arkın oluştuğu ortamın yüzey sertliğini etkileyebildiğini, nitrojen ve oksijen gibi elementlerin absorbe edilmesinin yüzey sertliğine önemli ölçüde katkı sağlayabildiğini göstermiştir [17]. Welsh'in ve diğer araştırmacıların yaptığı çalışmalarda çeliğin tungsten karbür veya tungsten karbür - titanyum karbür elektrotlarla kaplanması durumunda diğer kaplama yöntemlerine göre 6 ila 30 kat daha yüksek aşınma direnci elde edilebilmiştir [18],[19].

ESD yöntemi konusundaki ilk çalışmaların büyük çoğunluğu S.S.C.B. tarafından yürütülmüş olup neredeyse 1940'lı yıllara kadar uzanmaktadır. Birçok Sovyet yayınında ESD kaplama metodunun aşınmaya maruz kalan pek çok parçanın (torna takımları, matkap uçları, kalıplar, türbin bıçakları, kam milleri gibi) kaplama yapılarak ömrünün uzatılmasında ve aşınan kısımlarının tamir edilmesinde kullanılan yaygın bir metot olduğundan bahsedilmektedir.

S.S.C.B.'de yaygın olarak kullanılan ESD batıda özellikle Johnson'un 1974'de yaptığı çalışmalara kadar kısıtlı olarak uygulanmıştır. Johnson deneylerinde ESD kaplamalarının A.B.D.'deki nükleer reaktörlerde yüksek sıcaklık ve aşınma direnci gerektiren alanlarda geniş bir uygulama alanı olduğunu göstermiştir. 1990'ların başından itibaren de ESD kaplama uygulamaları artan bir ilgiyle umut veren bir yüzey işlem tekniği olarak daha çok yaygınlaşmaktadır.

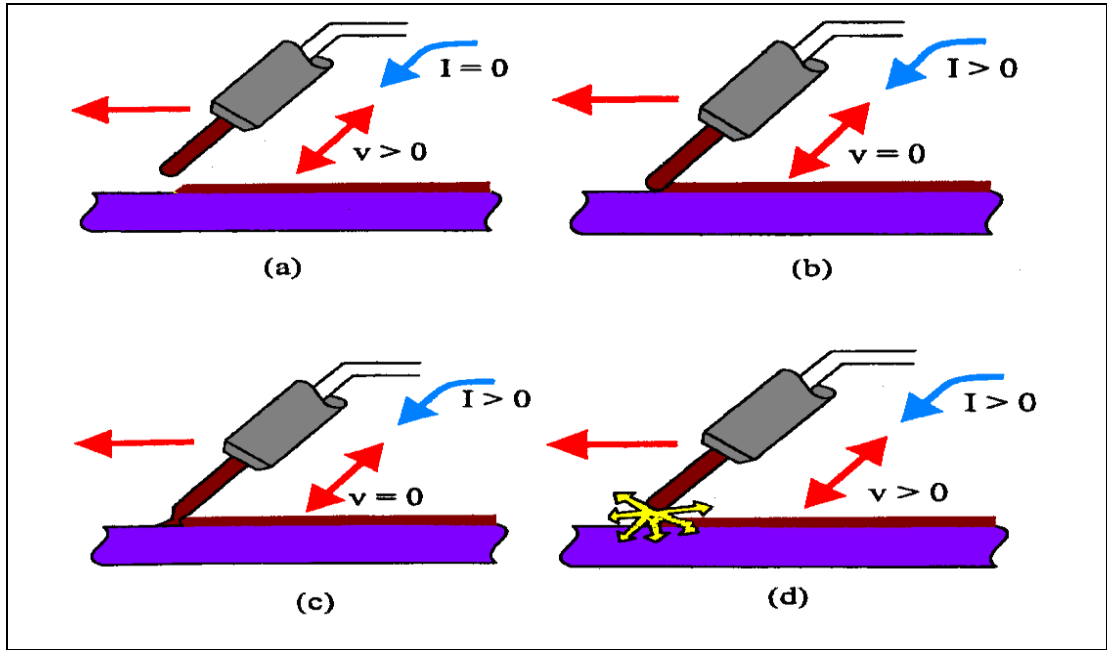
2.2. Elektro-Spark Sistemi Ve Uygulanması

Electro-Spark alaşımlama (Elektro-Spark Biriktirme) yöntemi, elektrot olarak kullanılan iletken bir malzemenin metalik bir altlık üzerine kat kat (deposit) biriktirilmesiyle kaplama işleminin gerçekleştirildiği darbeli (pulse) mikro-ark kaynağıdır.

Bu kaplama prosesi çok kısa süreler içinde (mikro saniyeler mertebesinde) yüksek elektrik akım darbelerinin (pulse) uygulanmasıyla altlık ile elektrot arasında oluşturulan kıvılcımlar (mikro elektrik kıvılcım-spark) neticesinde elektrot malzemenin ergimiş halde mikro damlacıklarının yerçekimi kuvveti de dahil bir takım statik ve dinamik kuvvetlerin etkisiyle altlık malzemeye transferinin gerçekleştirmesi üzerine dayanmaktadır [20].

Elektro-spark alaşım (depozisyon) prosesinde; alaşımı sağlayan malzeme (anot malzemesi), alaşımlanan yüzeyin (katot yüzeyin) üzerinde yüzey ile çok sağlam bir şekilde tutunan bir kaplama tabakası oluşturmaktadır. Bu durumda alaşımlama sonucu hem kaplama malzemesiyle ana malzeme arasında belirgin bir ayırıcı sınır oluşmaz ve hem de anot malzemenin esas malzemeye karışımı gerçekleşir.

Darbe (Pulse) üretici üzerindeki bir seri kapasitörde biriken elektrik enerjisi, elektrot altlığı temas ederken milisaniyeler içinde boşalır. Boşalan bu enerji elektrot ve altlık arasındaki boşlukta kıvılcımlar (spark) meydana getirir ve sıcaklığın binlerce santigrat dereceye yükselmesine yol açar, ki böylece bu hatlar üzerinde plazma kanalları oluştururlar. Plazmanın meydana getirdiği yüksek sıcaklık ve ani genişlemenin kaynaklanan vakum etkisiyle neredeyse eriyik hale gelmiş olan elektrot malzemesi (anot) yerçekiminin de yardımıyla altlık üzerine çekilerek sıvılaşmış bölgeye çarpar. Transfer olan kütlenin altlık üzerindeki sıvılaşmış bölgeyle karışması ve birlikte soğuması sonucu alaşımlama gerçekleşmiş olur. Çevrim sonunda altlık yüzeyinde anlık olarak alaşımlanan kısım katılaşır ve kaplama işlemi çevrimin tekrarlanmasıyla devam eder. Kaplama uygulamasında elektrotun altlığa yapışmasını önlemek için aplikatör vibrasyon yapar. Elektrot hareketi kendi eksenine etrafında dönme şeklinde de olabilir. Vibrasyonun veya dönme hareketinin frekansı / hızı kaplamanın pürüzlülüğünü etkiler. Genel olarak yüksek frekanslarda ve düşük güçlerde nispeten daha düzgün kaplama yüzeyleri elde edilebilir [23].



Şekil 2.2: ESD kaplama sisteminde malzeme transferinin şematik bir gösterimi. a) prosese başlamadan hemen önce I (akım) sıfır, titreşim mevcut ($v>0$), b) elektrot ile altlık arasında kısa devre (kontakt) gerçekleşir (akım geçer, $I>0$, $v=0$), c) kısa devrenin kalkmasından (akım kesilmeden) den hemen önce, d) elektrot ile altlık arasında elektrik spark (kıvılcım) oluşumu gerçekleşmektedir.

Şekil 2.2'de görüldüğü üzere Elektro-spark alaşım prosesi (ESD) kaplama sisteminde malzeme transferinin; a'da görülen prosese başlamadan hemen önce I (akım) sıfır, titreşim mevcut ($v>0$), b'de elektrot ile altlık arasında kısa devre (kontak) gerçekleşir (akım geçer, $I>0$, $v=0$), c'de kısa devrenin kalkmasından (akım kesilmeden) den hemen önce, d'de ise elektrot ile altlık arasında elektrik kıvılcım (spark) oluşumu gerçekleşmektedir [24].

Kullanılan elektrik akım darbeleri (pulse) diğer kaynak metotlarında olduğundan çok daha kısa sürelerde, 10^{-3} sn ler mertebelerinde olup darbe (pulse) frekansları 0,1 ile 4 kHz arasında uygulanmaktadır. Uygulanan elektrik akımının mikro saniyeler mertebesinde darbeli (pulse) olması bir çevrim (döngü) boyunca altlığın oluşan ısıyı dağıtmasına olanak sağlar ve ısı birikilmesine engel olunur. Malzemeye bağlı olmak üzere proseste 10^5 - 10^6 °C/sn gibi yüksek katılma hızları meydana gelir [25].

2.3. Elektro-Spark Alaşımlama İşlemi ve Karakteristikleri

Kaplama sırasında darbeler (pulse) halinde uygulanan yüksek elektrik akımı, altlık ve elektrot arasındaki küçük boşluktan geçerken temas bölgesini eritecek kadar yüksek bir ısı ortaya çıkmasına yol açar. Kısa sürede yükselen sıcaklığın etkisiyle elektrot ve altlığın kontak kesitlerinde lokal erimeler ve buharlaşmalar meydana gelir. Ancak uygulanan akımın çok kısa süreli olması sebebiyle (mikrosaniyeler mertebesinde) kütle transferi oldukça hızlı gerçekleşerek altlık yüzeyindeki lokal alaşımlama tamamlanır ve ani soğuma gerçekleşir. Bunda her bir kıvılcımın (spark) arasındaki zamanın, kıvılcımın uygulanma zamanına oranla çok daha fazla olmasının da önemli rolü vardır [26].

Böylece altlığa geçen ısının dağılmasına zaman tanınmış olur. Ayrıca altlığın sıcaklığında neredeyse hiçbir değişimin olmaması, ısıdan etkilenen bölgenin (heat affected zone -HAZ) minimize edilmesini sağlar. Parçaya geçen toplam ısı miktarı çok düşük olduğundan ve boyutlarının buna kıyasla büyük olmasından dolayı parçanın metalurjik ve fiziksel açıdan etkilenmesi ihmal edilecek düzeydedir. Diğer bir deyişle parçanın kaplama tabakası dışındaki kısımlarında mikro-yapıda herhangi bir değişiklik gerçekleşmez.

Alaşım bölgesinin oldukça hızlı ısı kaybetmesi (soğuması) sonucunda kaplamada yüksek yoğunluk ve dayanıma sahip küçük taneli bir yapı oluşur. Bu da ESD kaplamaların mükemmel yapışma özelliklerini, altlıkla metalurjik bir bağ oluşturmasını ve neticede iyi düzeyde aşınma ve korozyon direnci göstermesini sağlar.

Kıvılcımın (spark) gerçekleşmesini sağlayan dielektrik ortam (hava, argon vb.) sayesinde enerjinin boşaldığı kesitteki plazma da elektrot ve altlık arasında iyonize bir kanal oluşturarak boşalan akımı sürdürür. ESD işleminin gerçekleştiğı ortam gazı kütle transferi mekanizmasını etkiler. Hava ve nitrojen gibi gazlar yüksek termal iletkenliğe sahip bir plazma oluşturarak damlacık şeklinde kütle transferine yol açarlar. Bu durumda elektrotun ucunda erimiş damlacıklar oluşur ve plazmanın ivmelendirmesiyle altlığa düşer.

Eriyik damlacıklar yüzeye çarptıktan sonra dağılarak ve saçılarak pürüzlü ve kalın bir kaplama yüzeyinin oluşmasına yol açar. Ancak kıvılcım (spark) ortamında kullanılan argon gazı kolayca iyonize olarak ve nispeten düşük termal iletkenliğe sahip bir plazma oluşturarak eriyik metalin ince partiküller halinde yüzeye doğıru spreyleneğini sağlar. Sprey şeklinde gerçekleşen kütle transferi, damlacık şeklinde gerçekleşen kütle transferine göre daha pürüzsüz ve düzgün yayılmış bir kaplama tabakası meydana getirir.

Kütle transferinin ilk tabakaları elektrot ve altlığın ilk önce erimiş ve daha sonra katılmış olan karışımından oluşur. Kütle transferi tabaka tabaka devam ettikçe kaplama bölgesinin kimyasal kompozisyonu elektrodun kimyasal kompozisyonuna ulaşır ki bu koruyucu kaplama oluşumunun tamamlandığını gösterir [26].

2.4. Elektro-Spark Alaşımlama Yönteminin Avantaj ve Dezavantajları

ESD prosesin bir kaplama tekniği olarak birçok alanda yaygın bir şekilde kullanılması, bu prosesin diğer bazı yüzey modifikasyon yöntemlerine göre aşağıda da sıralandığı gibi belli başlı bazı avantajlara sahip olmasından kaynaklanmaktadır.

- İşlem sonucunda metalurjik bağlarla yapışmış bir kaplama tabakası elde edilir.
- Isıya maruz kalmış bölge (HAZ, Heat Affected Zone) çok küçük bir bölge olup yalnızca birkaç mm derinliğe kadardır (komponentin bir bütünü göz önüne alınırsa çok küçük bir ısınmış bölge söz konusudur).
- Düşük ısı girdisi sebebiyle malzemedeki fiziksel çarpılmalar ve metalurjik değişimler ortadan kalkar. Çok ince olan kaplama tabakası dışındaki ana malzemenin sıcaklığı işlem esnasında bile değişmez, ortam sıcaklığında kalır.
- Kaplama yüzeyindeki yüksek soğuma hızı ile amorf yapılar oluşabilmektedir.
- Neredeyse hiçbir iş parçası hazırlığına ve yüzey ön hazırlığına gerek olmamaktadır.
- İşlem tekrarlanabilir olup, kolayca kontrol edilebilmektedir.
- Operatörler kolayca eğitilebilir.
- ESD ekipmanı portatif olup kolayca taşınır ve kurulabilir.
- Uygun elektrotlar ile karmaşık şekilli yüzeylere uygulanabilir.
- Neredeyse tüm iletken malzemeler metalik bir yüzeyin üzerine kaplanabilir.
- Kaplamalar lokal olarak çok yüksek sıcaklıklarda gerçekleştiğinden yüzeye metalurjik bağ ile oldukça iyi bir yapışma göstererek son derece tatminkar aşınma direnci sağlarlar.
- Kaplama sayesinde malzemenin yüksek yük altındaki sürtünme özelliklerinde iyileşme sağlanır.
- Kaplamalar yüksek sıcaklıklarda çok iyi derecede aşınma ve korozyon dayanımı sergiler.
- Çeşitli kalınlık ve kompozisyonlarda kaplamalar oluşturulabilir.
- Kaplama işlemi özel atmosferik şartlar hazırlanmasını gerektirmez.
- İşlem sırasında çevreye zararlı atıklar ortaya çıkmaz.
- Kullanıcı açısından tehlikeli ve zararlı unsurlar içermez.

Diğer kaynak metotlarında olduğu gibi, ESD kaplama malzemesi ergimeden sonra hızla katılaşır ve bu nedenle daima kalıcı iç gerilmeleri oluşur. Bunun bir sonucu olarak ESD kaplamalar sıklıkla çatlak ve genellikle yorulmaya maruz kalan kritik komponentler için çok uygun değildirler. Örnek olarak yorulmaya karşı hassas olan türbin motor parçalarının onarımında kullanılmazlar. Bunların yanında kıvılcım (spark) kaynağı alev alabilen ortamlarda kullanılmamalı ve atık gazlar fark edilmez olduğunda (kadmiyum kullanılıyorsa) özel kontrol tedbirleri gerektirir. Ayrıca elektrot boyutunun küçük ve deposite hızının düşük olması sebebi ile büyük kaplama alanları için uygun değildir. Fakat küçük yüzeyler ve hatta girintili-çıkıntılı geometrilerde bile kullanılabilirler [27].

2.5. Elektro-Spark Alaşımlama Yönteminin Kullanım Alanları

ESD proses ile yapılan oldukça sert kaplamalar, aşınmaya dayanıklı yüzeylerde, yüksek sıcaklıklarda, oksitlenmeye ve korozyona maruz koşullar altında çalışan büyük komponentler de uygulandığı gibi belli başlı küçük komponentlerin (mil yatakları, torna ve matkap aynaları, pompalar, shaft tertibatında, araç-gereçlerde, kalıp ve lokmalarda, valf yatakları, blade (kanatçık), dişliler, enjektör uçları gibi vs) dayanıklılığını arttırmak ve onların yüzeylerini korumak için kullanılmaktadır.

Nükleer enerji veya kömür gibi fosil yakıtların kullanıldığı enerji santrallerinde, yüksek sıcaklıklarda kompleks gaz karışımı (O_2 , S_2 , H_2S , Cl , HCl gibi) veya sıvı sodyum gibi ortamlarda korozyona ve erozyona maruz kalan komponentlerin metalik (çoğunlukla çelik) yüzeyleri üzerine ESD ile Cr_3C_2 gibi seramik veya Fe-Al gibi alaşımlar (Cr, B, Nb, C, Mo, Zr içeren) kaplanmak suretiyle komponentlerin hizmet süreleri uzatılmıştır. [Natesan, 1987-1997; Johnson, 1974-1984].

Endüstrinin hemen hemen her sahasında çok yaygın bir şekilde kullanılan çeliğin korozyona karşı korunması dışında kullanıldığı yere göre mevcut mekanik özelliklerini daha da geliştirmek veya başka özellikler kazandırmak için çelik üzerine ESD yoluyla kaplamalar yapılmış ve bunlar bazı testlere tabi tutulmuştur. Bu amaçla 316 paslanmaz çelik üstüne kaplanmak üzere WC, Cr₃C₂ gibi çok sert, Co içeren orta sertlikteki alaşımlar veya Ag gibi yumuşak metaller içeren farklı elektrot malzemeler seçilmiştir. Bu elektrotlar ile paslanmaz çelik numuneler üzerine yapılan kaplamalar şiddetli aşınma ve burulma testlerine maruz bırakılmış, paslanmaz çelik numunelerin aşınma ve burulma mukavemet değerleri üzerinde önemli gelişmeler kaydedilmiştir [Sheldon, 1995].

AISI 1020 ve 1018 karbon çelik numuneler üzerinde ESD ile TiB₂ kaplanarak ultra sert yüzeyler elde edilmiştir [Agarwal,1998; 1999]. HSS takım çelikler üzerinde yapılan kaplamalarda da takım çeliklerin ömrü % 2000 arttırılmıştır [Brown, 1990]. AISI 304 paslanmaz çelik üzerine ESD ile Cr₇C₃ gibi seramik tabaka veya Fe bazlı amorf alaşım (Fe, Cr, Mo, Cd, C, B) elektrot kullanılarak 1542 Hv sertlikte kaplama elde edilmiştir [Frangini,2002; Liu,2007]. Çelik dışında endüstride çok yaygın bir şekilde kullanılan Ti6Al4V alaşımına da daha yeni özellikler kazandırmak amacıyla saf Ni elektrot kullanılarak ESD ile kaplama prosesinde çatlaksız, üniform ve metalurjik bağlı Ni-Ti alaşım bir deposit tabaka elde edilmiştir [Sheldon, 1988].

Son yıllarda ESD proses yoluyla yapılan kaplamalarda, elde edilen yeni özellikleri maksimum derecede arttırmak için daha değişik elektrot çiftleri kullanılması metodu dışında proses esnasında verimi arttırmak için kullanılan ekipman ve proses üzerinde de çalışmalar yapılmıştır. Eski pulse jeneratörlerinde kullanılan R-C devrelerin yerine yarı iletken teknolojisinden faydalanılarak üretilen transistör lü devrelerin bilgisayar kontrollü ESD kaplama sistemlerin kullanılması ile proses daha hızlı ve daha verimli hale getirilmeye çalışılmış mevcut kaplama kalınlıkları 3 ila 4 kat arasında arttırılmıştır [He,2002; Wang,1997; Staia,2001].

Bunlara ilaveten ayrıca bu proses döküm kalıpcılığında olduğu gibi girintili çıkıntılı küçük yüzeylerdeki hataların giderilmesi için yada mevcut komponentlerin küçük tamir ve onarımlarında da kullanılmaktadır [28]. Aşağıdaki ana başlıklar altında ESD alaşımlama yönteminin kullanıldığı alanlar görülmektedir:

- Nükleer, fosil ve jeotermal enerji ortamlarda,
- Havacılık ve uzay uygulamaları için yüksek sıcaklık komponentlerinde,
- Buhar ve gaz türbin kanatçıkları kaplamalarında,
- Endüstriyel kesici takımlarında,
- Metal işleme ve El aletlerinde,
- Gemi inşası ve komponentlerinde,
- Tıp ve dişçilik de cerrahi ve muayene aletlerinde,
- Çok büyük boyutlardaki tarım ve tekstil ekipmanların aşınmaya dirençli yüzeylerinde,
- Metal kesme makaslarında,
- Ormancılıkta; tomruk, ağaç ve kağıt ürünleri işleme aletlerinde,
- Atıkların geri kazanımı ve su arıtma santrallerinin korozif ortamlarında,
- Yüksek sıcaklık sensörlerinde,
- Petrokimya ve ilaç endüstrisinde kullanılan sistemlerde,
- Modern spor ekipmanlarında,
- Kalıp dökümcülüğünde vs. kullanılır.

Kalıp dökümcülüğündeki örnek olarak belli başlı uygulamaları;

- Kalıplardaki ısıl çatlakların engellenmesi ve onarımında,
- Çizik ve çentiklerin önüne geçilmesinde ve onarımında,
- Kaynak altı ve küçük çatlaklar gibi kaynak hatalarının onarımında,
- Plastik ve lastik (kauçuk) üretimi için kullanılan döküm kalıplarında üretim esnasında oluşan çapakların önüne geçmek için kalıp perde hatlarının onarımında,
- Kalıp kanallarındaki oyukların ve izlerin onarımında, aşınmaların engellenmesinde,
- Kalıp kanallarındaki değişikliklerde ve modifikasyonlarda,
- Kalıplar üzerindeki kavıty (kovuk) artıklarını önlemede,
- Kalıplarda kayma deformasyonu (slide-shear) sonucu oluşan bölgelerin onarımı ve tamirinde kullanılması şeklinde genel hatları ile sıralanabilir.

3. DENEYSEL UYGULAMA ve BULGULAR

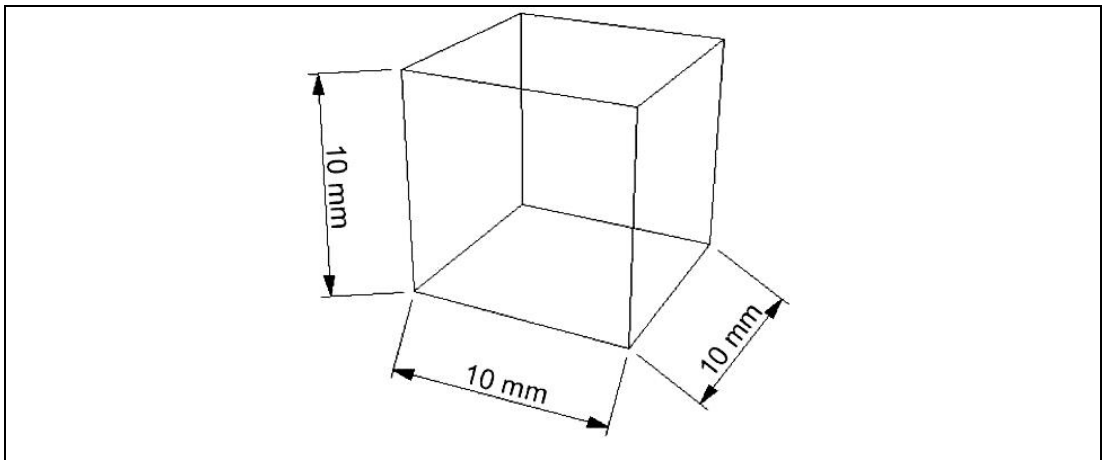
3.1. Kaplama Numunelerinin Hazırlanması

ESD Kaplama prosesinde altlık olarak kullanılacak numuneler St37 düşük karbonlu çelik malzemeden Şekil 3.1’de görüldüğü üzere yaklaşık 10x10x10 mm ölçüsünde küp şeklindedir. Numunelerin bir yüzeyi markalamak için numaralandırılmış ve diğer beş yüzeyi kaplamak için boş bırakılmıştır. ESD prosesin bir özelliği olarak numunelerin bir ön hazırlığa ihtiyacı yoktur. Fakat uzun süre saklanabilmesi için çelik numuneler gres yağında muhafaza edildiklerinden kaplama öncesi her numune benzin ve alkol ile temizlenmektedir.

ESD proses ile yapılan kaplamalar da kullanılacak elektrot malzemeler elektrik iletkenliğe sahip olması şartıyla geniş bir yelpazede seçilebilir. Yüksek sertlikte, aşınmaya dirençli kaplama elde etmek için uygulamada elektrot olarak nikelkrom - kromkarbür elektrotlar seçilmiştir. Ağırlıkça %Cr₃C₂-NiCr (%75-25) toz karışımın, presle şekil verildikten sonra sinterlenmesi ile üretilmiş, yaklaşık 8 mm² kesit alanına sahip ince dikdörtgen çubuk şeklindeki elektrotlar hazır olarak temin edilmiştir.

Tablo 3.1: St37 çeliğinin kimyasal kompozisyonu.

St37	KİMYASAL KOMPOZİSYON (% ağırlık)							
	C	Mn	P	S	Si	Cu	Cr	N
	0.17	1.50	0.045	0.045	0.35	0.60	0.30	0.009



Şekil 3.1: ESD yönteminde kullanılan 10x10x10 mm'lik St37 çelik altlık numune.

3.2. Numunelerin Karakterizasyonu

ESD prosesinin karakterize edilebilmesi için, proses sonucu kaplamada transfer edilen kütle miktarı ölçümü metodunu, deneylerde kullanılan tüm numunelere uyguladık. 0.1 mg duyarlılıktaki Metter Toledo 200 marka hassas bir terazi ile her altlık numunenin kaplama öncesi ve sonrası ağırlıkları ölçülerek kaplama prosesi esnasında altlık numunelere transfer edilen kütle miktarları relatif olarak elde edilmiştir. Her proseste kullanılan numunenin beş yüzeyinde kaplama yapıldığı için sonuçlar beşe bölünüp ortalaması olarak alınmıştır.

Numunelerin Electro-spark biriktirme (ESD) kaplaması uygulanmadan önce, Electro-spark biriktirme (ESD) tekniği kullanılarak kromkarbür-nikelkrom ($\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-25NiCr}$) elektrotlarla kaplama uygulandıktan sonra, ve kullanılan elektrotların X-Ray Difraktometre cihazında analizleri yapılmıştır. Analizler RIGAKU marka D/Max 2200 model, $\text{CuK}\alpha$ radyasyonu kullanan ($1.54050 \text{ \AA}$) ve $40\text{kV} / 40 \text{ mA}$ 'de çalışan bir difraktometre ile yapılmıştır.

Kaplanan numunelerden bir kaç standart metalografik metotlarla hazırlanarak yüzey morfolojisi ve EDX analizleri için Philips XL 30 SFEG model bir taramalı elektron mikroskobu ile incelenmiştir. İncelenecek numuneler önce Struers-Minitom model bir hassas disk kesicilerde kaplama yüzeyini dikey kesecek şekilde kesilmiş ve daha sonra bakalitler içine alınmıştır. Bakalite oturtulmuş numuneler SEM de incelemeye hazır hale gelmesi için sırasıyla 500, 800, 1000 ve 1200 gritlik zımparalarla Struers Labopol-5 marka parlatma cihazı kullanılarak parlatılmıştır. Daha sonra $3 \mu\text{m}$ 'lik pasta sürülen keçeyle parlatmaya tekrar tabi tutulmuştur. Ayrıca numuneler ultrasonik titreşimle alkol içinde temizlenmiştir.

Kesit üzerinden kaplama kalınlığı ölçümü ve line-EDX taraması yapılacak olan numuneler elmas disk kesiciyle ikiye kesilmiştir. Kesiti alınan numuneler bakalite oturtularak sırasıyla 320,500, 800, 1000 ve 1200 gritlik zımparalarla Struers Labopol-5 marka parlatma cihazı kullanılarak parlatılmıştır. Daha sonra $3 \mu\text{m}$ 'lik pasta ile keçede parlatma uygulanmıştır.

Sertlik ölçümünde Vickers mikro sertlik testi uygulanarak, Zeiss Optik Mikroskobu ile sertlik değerleri ölçüldü. Sertlik değerleri 20gr yük ve 5sn uygulama süresi ile elde edilmiştir. Elde edilen sertlik izleri (elmas uç piramit koniğin) SEM de ölçüldü.

Aşınma testi kuru ortamda oda sıcaklığında alümina (Al_2O_3) bilyenin numune yüzeyini aşındırmasıyla gerçekleştirilmiştir. CSM Tribometer cihazı ile ölçülmüştür. Deney süresince 5N yük 75 metre boyunca maksimum hızı 20 cm/sn olacak şekilde uygulanmıştır. Alümina (Al_2O_3) bilye aynı çizgi üzerinde ileri-geri hareket ederek numune yüzeyini aşındırmıştır. Sürtünme katsayısı $\mu=F/N$ şeklinde tanımlanmıştır. F sürtünme kuvveti, N ise uygulanan yüküdür.

3.3. ESD Metoduyla Kaplama İşlemi

Cr₃C₂-NiCr esaslı kaplamalar oluşturarak yüzeylerin modifikasyonunda (hardfacing) oldukça başarılı sonuçlar elde edilmiştir. [29],[53].

S.Frangini, A.Masci ve A.Bartolomeo beraber yaptıkları çalışmada ESD yöntemiyle paslanmaz çelik numunelere Cr₇C₃ bazlı sermet kaplamalar alaşımlandı. Bu çalışmada 10-30µm kalınlığında tam olarak, yoğun, düzgün ve güçlü bir yapışkan kaplama tabakası elde etmek mümkün oldu.

Bu kaplama sisteminin korozyon özellikleri, geleneksel anodik polarizasyon testler ve empedans ölçümleri ile HCl elektrolit içinde değerlendirildi. Sonuçlar, kaplamanın genel ve lokal korozyona karşı direncini olağanüstü arttırdığını gösterdi. ESD işlemi sırasında meydana gelen bazı yüzey gerilim mikro-çatlakları HCl içinde bile uzun bir süre batırıldıktan sonra kaplamanın korozyona karşı direncini bozmamaktadır [29].

A. Zikin, I. Hussainova ve arkadaşları ile beraber yaptıkları çalışmada Plazma Transferli Ark (PTA) teknolojisiyle aşınmaya dayanıklı yüzeylerin modifikasyonu (hardfacing) için krom-karbür bazlı sermet parçacıklar (NiCrBSi, Cr₃C₂, Cr₃C₂-Ni) başarıyla uygulandı. Setlik değerlerine bakıldığında NiCrBSi alaşımının (bileşik) vickers sertliği 375 ± 6 HV iken Cr₃C₂ takviyeli kaplama 569 ± 13 HV vickers sertlik gösterdi. Cr₃C₂-Ni sermet parçacıklar ise ortaya 730 ± 110 HV sertlik değeri çıkardı. Çok fazlı malzeme yapısı sertliği ve mikroyapısal özellikleri büyük ölçüde etkiler. Cr₃C₂-Ni takviyeli kaplamanın yüksek sıcaklıklarda aşınma miktarının da düştüğü gözlemlendi [30].

Tahar Sahraoui, Nour-Eddine Fenineche ve arkadaşları beraber yaptıkları çalışmada gaz türbin millerinin onarımında yüksek hızda oksit yakıt püskürtme (HVOF) yöntemi kullanılarak $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ ve WC-Co kaplamaların yapısı ve aşınma davranışlarını araştırmak ve çeşitli test koşullarında özelliklerini karşılaştırmaktır. Sert krom kaplamalar (Cr_3C_2) gaz türbin millerini orijinal boyutlarına geri getirmek için aşınmış yüzeylerinin onarımında kullanılır. HVOF püskürtme işlemi boyunca karbürlerin fraksiyonu korunmuş olup kaplamalar yüksek hacimleriyle yüksek sertlik gösterdiler. Sertlik ve aşınma direncine bakıldığında WC-Co kaplamaların sertlik ve aşınma direnci $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-25NiCr}$ kaplamalara göre daha iyi sonuçlar verdi. Aynı zamanda HVOF ile püskürtülen $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-25NiCr}$ ve WC-Co kaplamalar karşılaştırıldığında, WC-Co kaplamaların daha düşük gözenekliliğe sahip oldukları görüldü. Yorulma hasarlarında da sertlik farkından dolayı WC-Co kaplamaya göre $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-25NiCr}$ kaplamada daha sünek bir kırılma olduğu gözlemlendi [31].

Hazoor S. Sidhu, Buta S. Sidhu, S. Prakash beraber yaptıkları çalışmada yine yüksek hızda oksit yakıt püskürtme (HVOF) yöntemi kullanılarak $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ ve WC-Co kaplamalar yapıp aşınma davranışlarını mukayese etmişlerdir. WC-Co kaplamaların $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ kaplamalarla karşılaştırıldığında daha yüksek aşınma direnci, düşük porozite, yüksek sertlik miktarı ve daha düşük sürtünme katsayısına sahip olduğu anlaşıldı. Ayrıca kaplamaların aşınma yüzeylerindeki oksit tabakalar açıkça belirlendi ve metal metal aşınmalarını engellediği ortaya çıktı [32].

Çalışmadaki amaç çelik üzerinde koruyucu bir tabaka oluşturmaktır. Bunun için ESD metoduyla $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ elektrotlarla kaplanma denenmiş ve uygulama sonucunda yüzeyde Cr_7C_3 , NiCrFe ve Martensite (Fe,C) bazlı bir kaplama elde edildiği tespit edilmiştir. ESD kaplama işlemi taşınabilir bir ESD ünitesi ile gerçekleştirilmiştir. Kaplamada kullanılan elektrotlar kromkarbür-nikelkrom ($\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$)'dan oluşmaktadır.

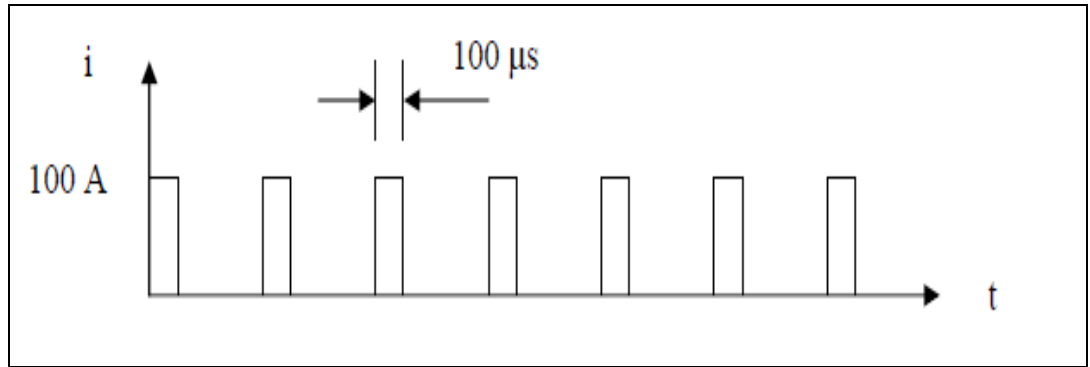
Kaplama işlemine başlamadan önce küp şeklindeki St37 çelik altlık numune kaplanacak yüzeyi üste gelecek şekilde mengeneyle sıkıştırılmıştır. Mengenenin elektrik devresine bağlı olması sebebiyle çelik numune katot, elektrot ise bir elektrot tutucu ile sabitlenerek anot olarak görevlendirilmiştir.

Daha sonra güç ünitesi çalıştırılarak kromkarbür- nikelkrom ($\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$)'dan oluşan elektrot altlık numunenin yüzeyinde kıvılcım (spark) oluşumu sağlayacak şekilde yüzey üzerinde elle hareket ettirilmiş ve kaplama uygulanmıştır.

İşlem yapılırken elektrot yüzeye bastırılmadan kendi elektrot tutucu ağırlığına bırakılmış ve aynı zamanda sağa ve sola hareketler ettirilerek yüzey üzerinde gezdirilerek kaplamanın boşluk kalmayacak şekilde oluşması sağlanmıştır.

Kromkarbür-nikelkrom ($\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-25NiCr}$)'dan oluşan elektrot ile numunenin sırayla 5 yüzeyinin tümü, kenarlarında boşluk kalmayacak ve kaplama yüzeyleri süreklilik sağlayacak şekilde kaplanmıştır. Her yüzeyin kaplaması tamamlandıktan sonra parça mendenen sökülüp ve diğer kaplanacak yüzey üste gelecek şekilde tekrar bağlanarak kaplama en son yüzey de kaplanana kadar her yüzey için aynı şartlarda tekrar edilmiştir.

Yapılan ESD kaplamasında güç kaynağının kontrolünde $100\mu\text{s}$ 'lik, $200\mu\text{s}$ 'lik, $300\mu\text{s}$ 'lik sürelerle 100A 'lık akım darbeleri (pulse) uygulanmıştır. Şekil 3.2'de $100\text{A-}100\mu\text{s}$ olarak uygulanan bir akım çevrimi, yaklaşık olarak dikdörtgen dalga formunda olduğu görülmektedir.



Şekil 3.2: ESD işleminde uygulanan akım zaman grafiği.

Tablo 3.1'de görüldüğü üzere $100\text{A-}100\mu\text{s}$, $100\text{A-}200\mu\text{s}$ ve $100\text{A-}300\mu\text{s}$ darbe (pulse) paketlerinde mukayese açısından deney şartlarının tümünde 3C elektrik yükü sabit olacak şekilde uygun frekanslar kullanılmıştır. Ayrıca elektrot altlık arası boşluk gerilimi (IEG) 17 Voltta sabit tutuldu. Elektrot tutucunun titreşim frekansı da sabit 100Hz 'dir.

Tablo 3.2: ESD yöntemiyle kaplama deneylerinde kullanılan darbe (pulse) paketleri.

Akım Şiddeti	Toplam Elektrik	Pulse Süresi	Pulse Yüğü	Pulse Enerjisi	Frekans
100A	3C	100µs	0,00975C	0,116j	308Hz
100A	3C	200µs	0,01800C	0,310j	166Hz
100A	3C	300µs	0,02700C	0,475j	111Hz

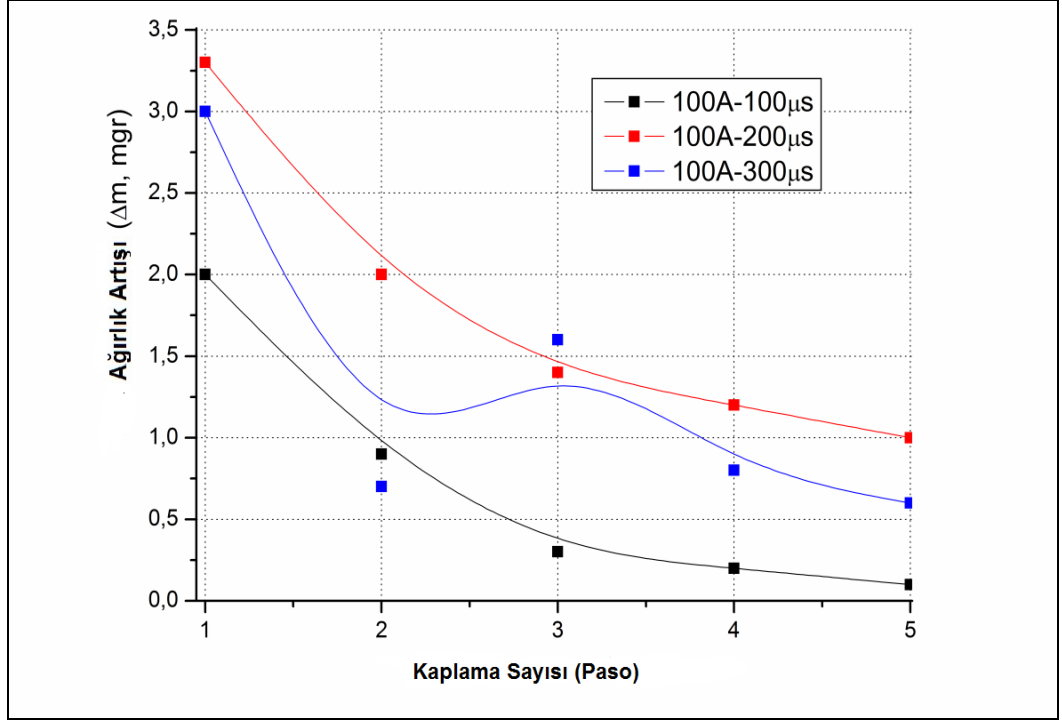
3.4. ESD Metoduyla Kaplama İşleminde Ağırlık Artışı

ESD prosesi sonrasında çelik altlıktaki ağırlık değişimlerini daha iyi analiz edebilmek için her kaplamadan sonra, hassas terazide ölçülen değerlerden bir önceki kaplamada elde edilen değerlerin farkı alınarak kaplama sayısına (paso) göre ağırlık değişimleri elde edildi. Bu değişimler Şekil 3.3.'de ki grafikte verilmiştir.

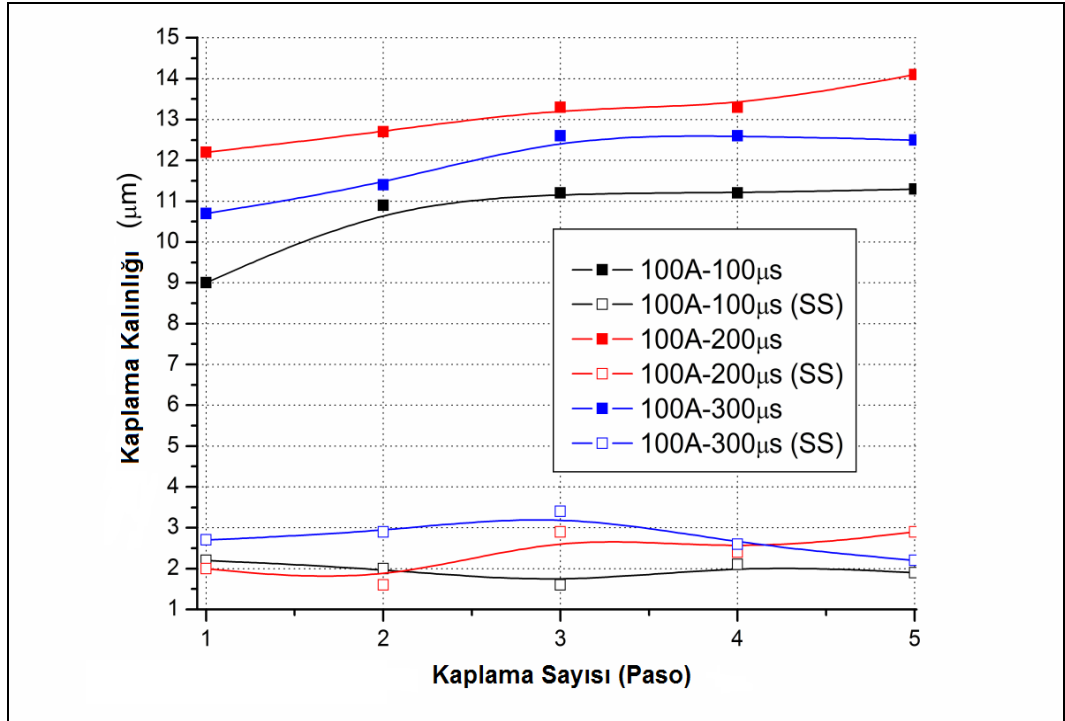
Şekil 3.3 ve 3.4'de grafiklerden de anlaşılmaktadır ki kullanılan 100A-100µs ile 100A-200µs akım şiddetlerinde altlıktaki ağırlık artışları arasında bir uyum söz konusudur. Süreyi birlikte azalıp veya artırmakla beraber ağırlık artışı da artış veya azalış gösterdi. Ancak 100A-300µs akım şiddetlerinde bu doğru orantı görülmedi. Süreyi artırmamıza rağmen altlıktaki ağırlık artışları arasında uyum söz konusu olmadı.

Şekil 3.3 ve 3.4 dikkatlice incelenirse çelik altlığın kazandığı ağırlığın kaplama kalınlığıyla da doğru orantılı olduğu görülebilir. Ağırlık artışı ne kadar fazla olursa kaplama kalınlığı da o oranda artacaktır. Burada en uygun ağırlık artışı ve kaplama kalınlığı 100A-200µs akım değerlerinde elde edildi. Süreyi 300µs çıkarmamız durumunda ağırlık artışında ve kaplama kalınlığında artış görülmedi.

Şekil 3.3'de darbe (pulse) süresinin artması ile ağırlık artışının yani çelik altlıktaki ağırlık kazanımında da giderek azalan bir şekilde de olsa bir artış söz konusudur. Ancak 100A-300µs darbe süreli darbe paketindeki ağırlık artışları 100A-200µs darbe süreli paket ile elde edilenden daha azdır. Ayrıca kaplama sayısı (paso) arttıkça transfer edilen ağırlık miktarındaki artışlar giderek azalmakta ve stabil bir duruma ulaşmaktadır.



Şekil 3.3: Dikdörtgen impulse formundaki, 100A(100 μ s, 200 μ s, 300 μ s) sürelerde darbelerin (pulse) uygulanması ile elde edilen ağırlık artışlarının kaplama sayısına (paso) göre değişimi.



Şekil 3.4: Dikdörtgen impulse formundaki, 100A(100 μ s, 200 μ s, 300 μ s) sürelerde darbelerin (pulse) uygulanması ile elde edilen kaplama kalınlığının kaplama sayısına (paso) göre değişimi.

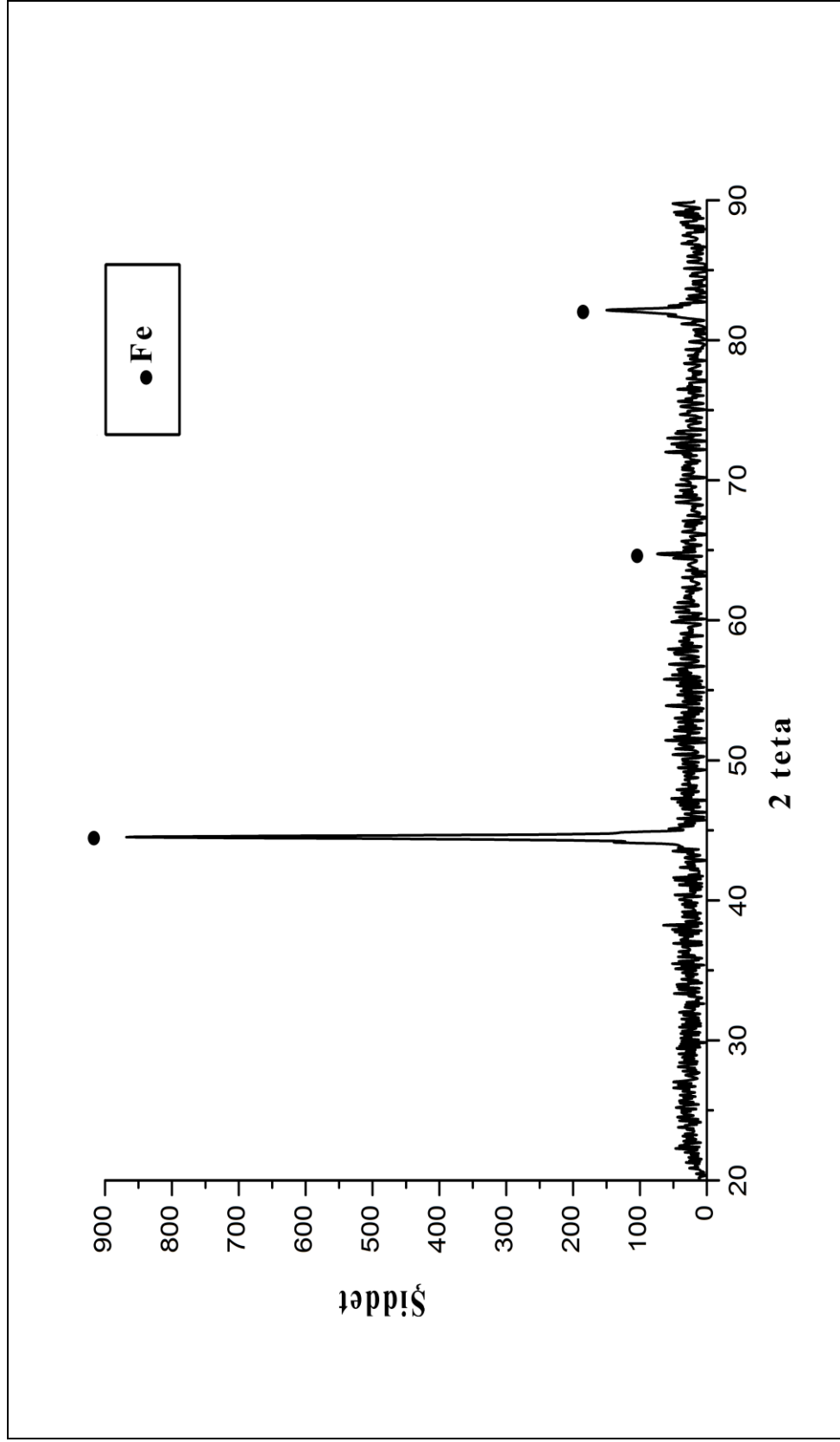
3.5. ESD Metoduyla Kaplama İşleminde XRD Sonuçları

ESD işlemi öncesinde, altlık olarak kullanılan St37 çelik numunelerin ve kromkarbür-nikelkrom ($\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-25NiCr}$) esaslı elektrotun X-Ray Difraktometre analizleri yapıldı. Kaplamasız St37 çelik altlık numune, ESD ile kaplanmış numune ve elektrotlar için X-Ray Difraktometre analizi sonuçları ve yüzeyde tespit edilen oluşumlar Tablo 3.2’de liste olarak verilmiştir.

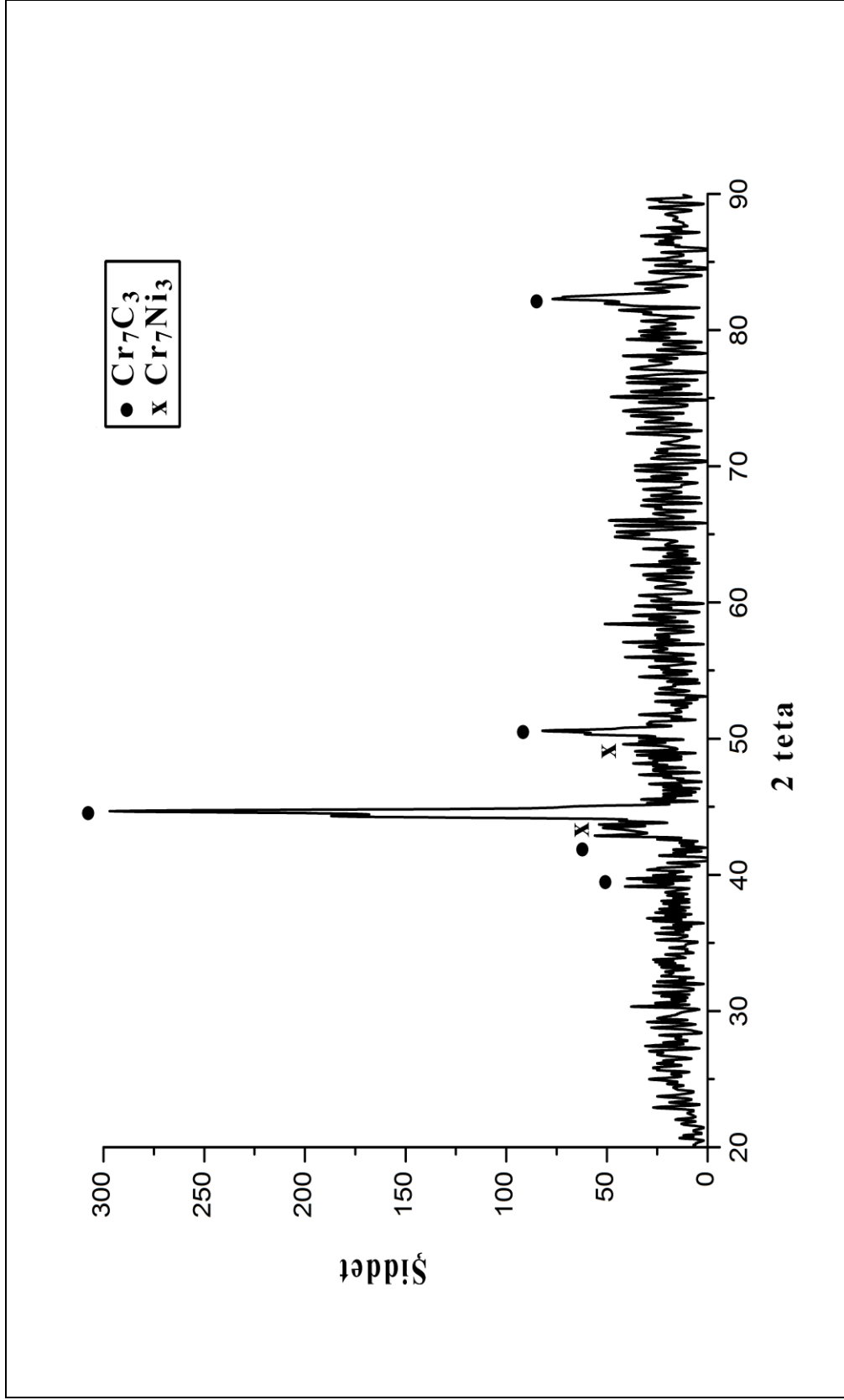
Tablo3.3: Altlık, Elektrotlar ve Kaplanmış numunelerin X-Ray Analizi Sonuçları.

ÖLÇÜM	UYGULAMA	ANALİZ SONUCU
1	St37 çelik altlık numune	Fe
2	Elektrotlar ($\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-25NiCr}$)	Cr_7C_3 Cr_7Ni_3
3	ESD yöntemi ile kaplanmış çelik	Cr_7C_3 NiCrFe Martensite(Fe,C)

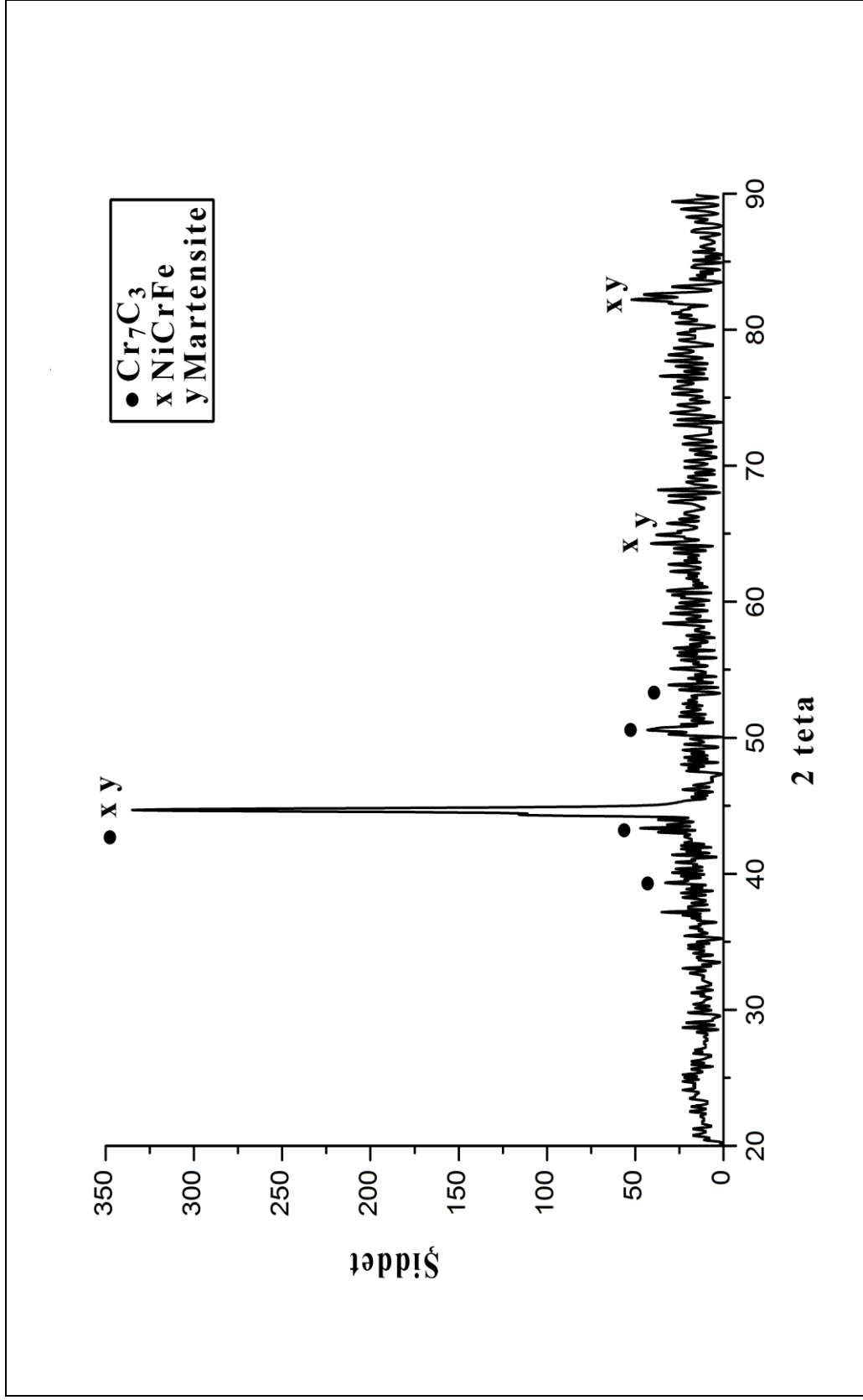
Düşük karbonlu çelik altlığımızda X-Ray Difraktometre analizi sonrası Fe fazı gözlemlenmektedir. C alınan pikte bu nedenle düşük çıkmıştır (Şekil3.5). Kullanılan Elektrotlar(KromKarbür-NikelKrom) %75Cr-%25Ni oranına sahip olduğundan Cr_7C_3 ve Cr_7Ni_3 fazları analiz edilmiştir (Şekil3.6). ESD ile kaplanmış numunede ise elde edilen kaplama tabakasının altlık çelik ile kromkarbür-nikelkrom ($\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$) elektrotun bir alaşımından ibaret olduğundan dolayı yapıda sadece için Cr_7C_3 , NiCrFe ve Martensite (Fe,C) fazları tesbit edilmiştir (Şekil3.7).



Şekil 3.5: Kaplamasız Çelik altlık numunenin X-Ray grafiği.



Şekil 3.6: ESD kullanılan KromKarbür-NikelKrom elektrotların X-Ray grafiği.

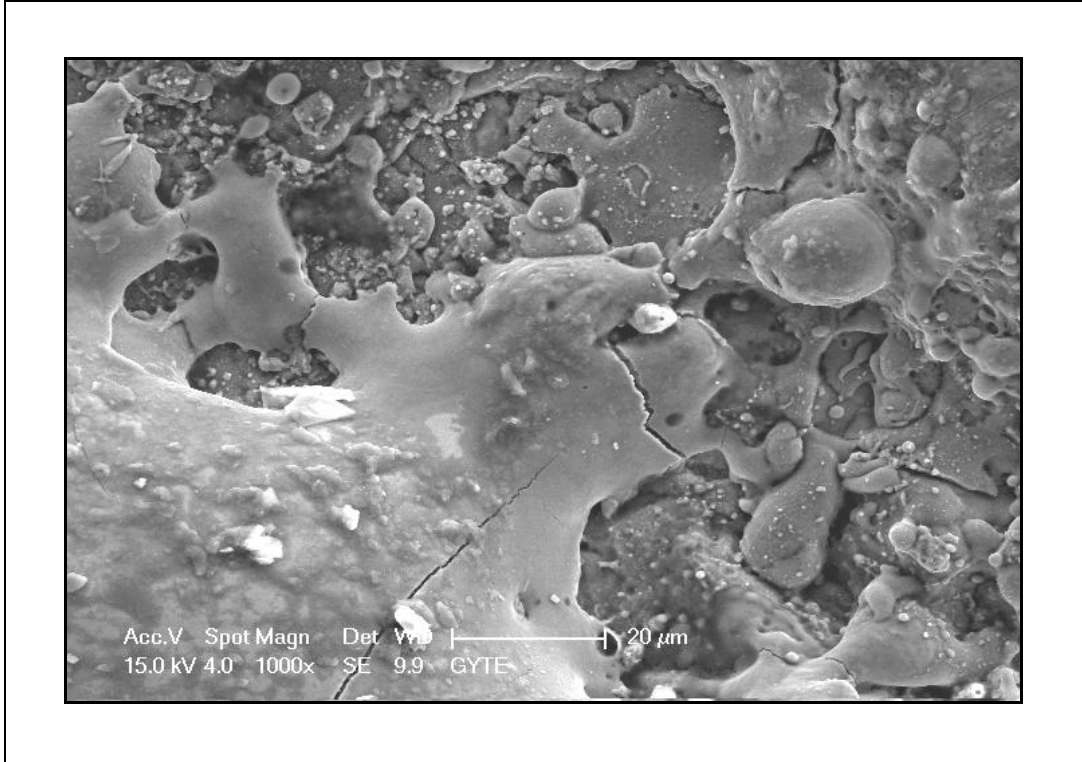


Şekil 3.7: ESD Kaplı numunenin X-Ray grafiği.

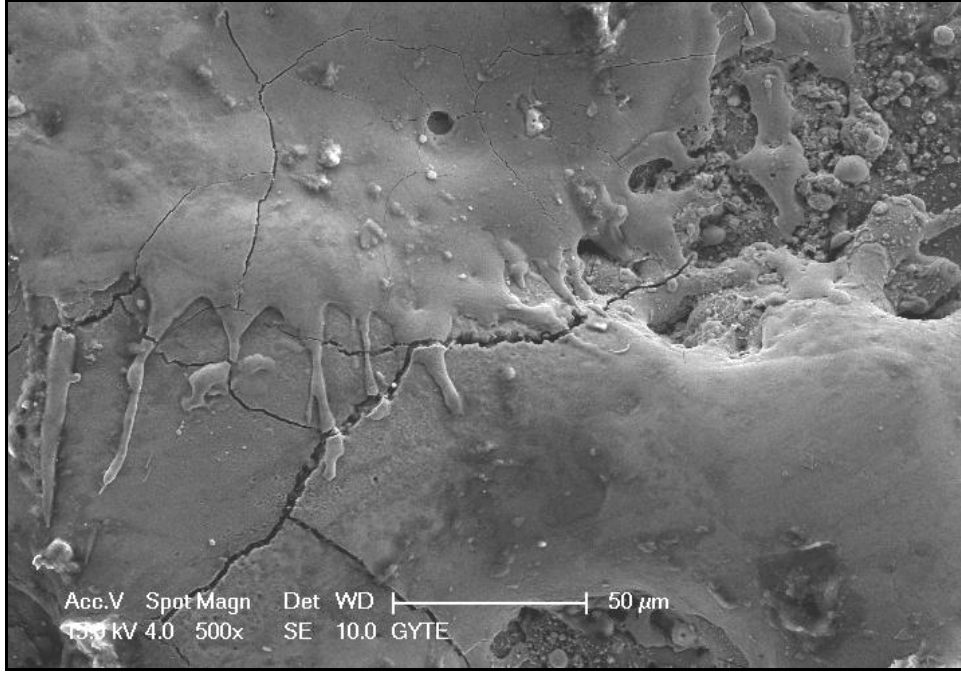
3.6. Kaplamaların SEM ve EDX Analizleri

ESD tekniği ile yapılan kaplamalardan bir kaçı daha önce bahsettiğimiz şekilde hazırlandıktan sonra kaplamaların morfolojik yapısını incelemek ve kimyasal yapı analizlerini araştırmak için EDX (Energy Dispersive Spectrum) donanımlı bir SEM (Scanning Electron Microscope) SEM (Philips XL30 SFEG) cihazında yapılmıştır.

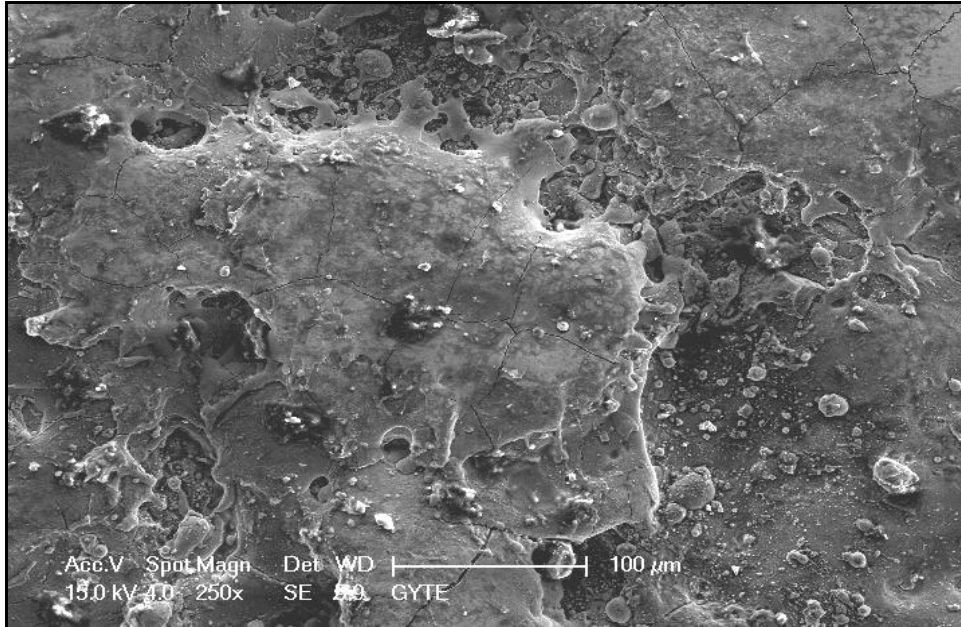
ESD ile tüm 5 yüzeyi kaplanan numune yüzeyinden SEM ile alınan yüzey morfolojisi görüntüsünde kaplamanın dağılımı görölmektedir (Şekil 3.8). Bu görüntüde kaplamanın uygulanması esnasında meydana gelen mikro-damlacıkların yüzeye çarpması sonucunda yüzeyde saçılmalar (splash) olduğu görölmektedir.



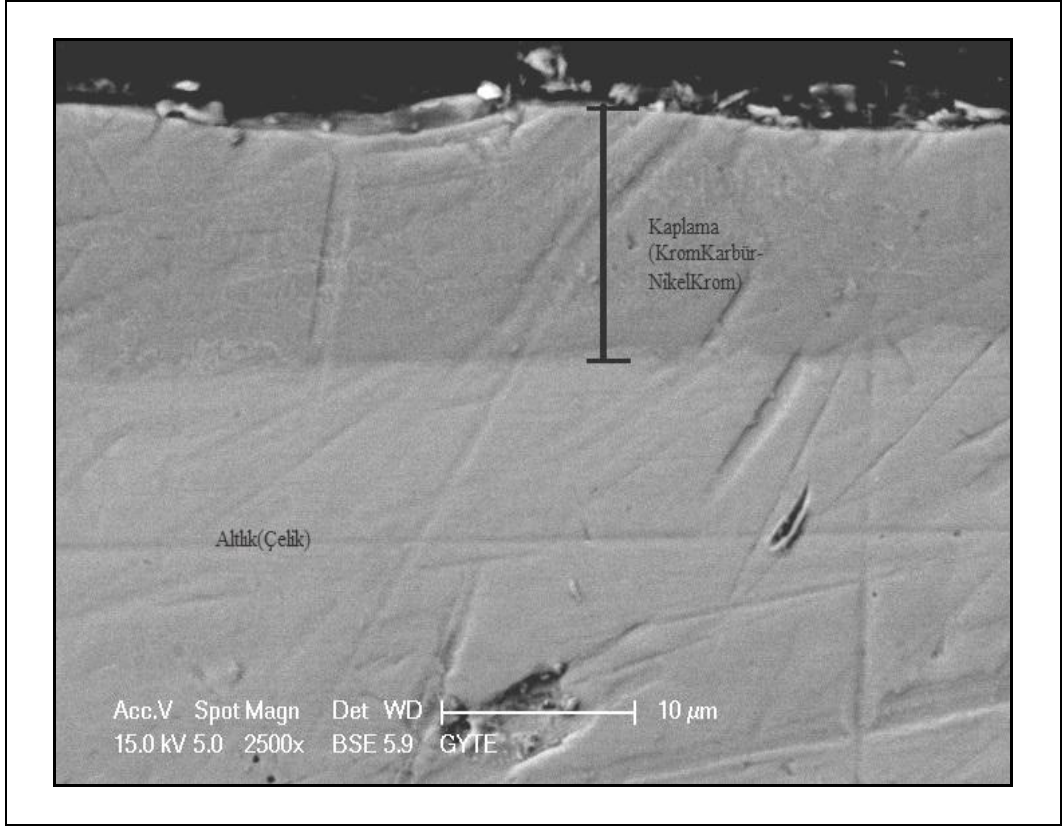
Şekil 3.8: ESD tekniğiyle $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ kaplanmış olan numunenin SEM ile alınmış yüzey morfolojisi görüntüsü.



Şekil 3.9: ESD tekniğiyle Cr_3C_2 -NiCr kaplanmış olan numunenin SEM ile alınmış yüzey morfolojisi görüntüsü.(Yüzeyde saçılmalar (splash) olduğu görülmektedir.)



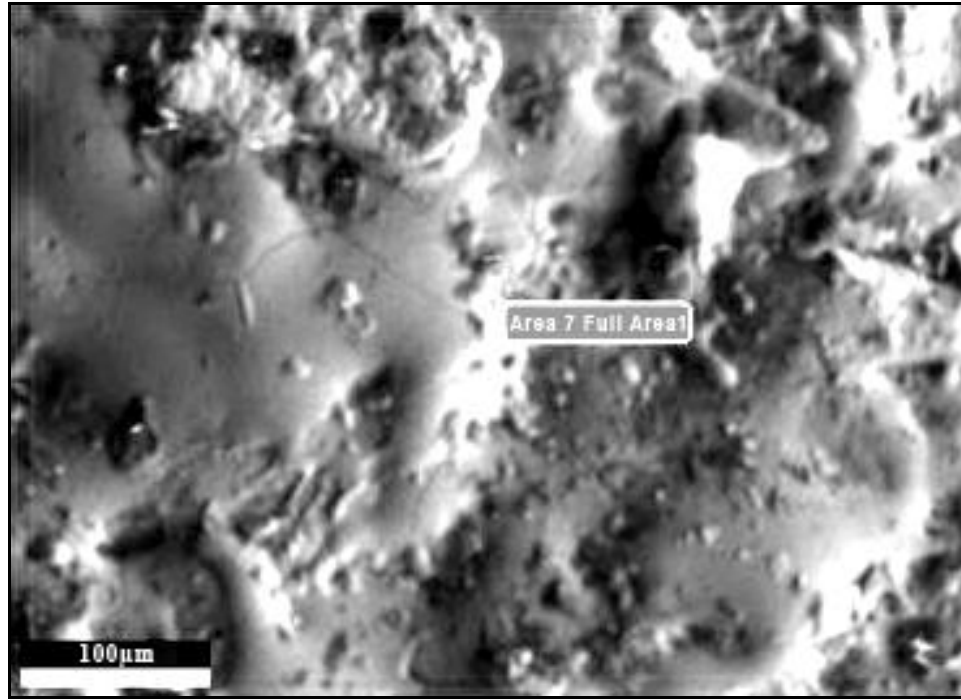
Şekil 3.10: ESD tekniğiyle Cr_3C_2 -NiCr kaplanmış olan numunenin SEM ile alınmış yüzey morfolojisi görüntüsü.(Yüzeydeki saçılmaların (splash) üst üste bindiği görülüyor.)



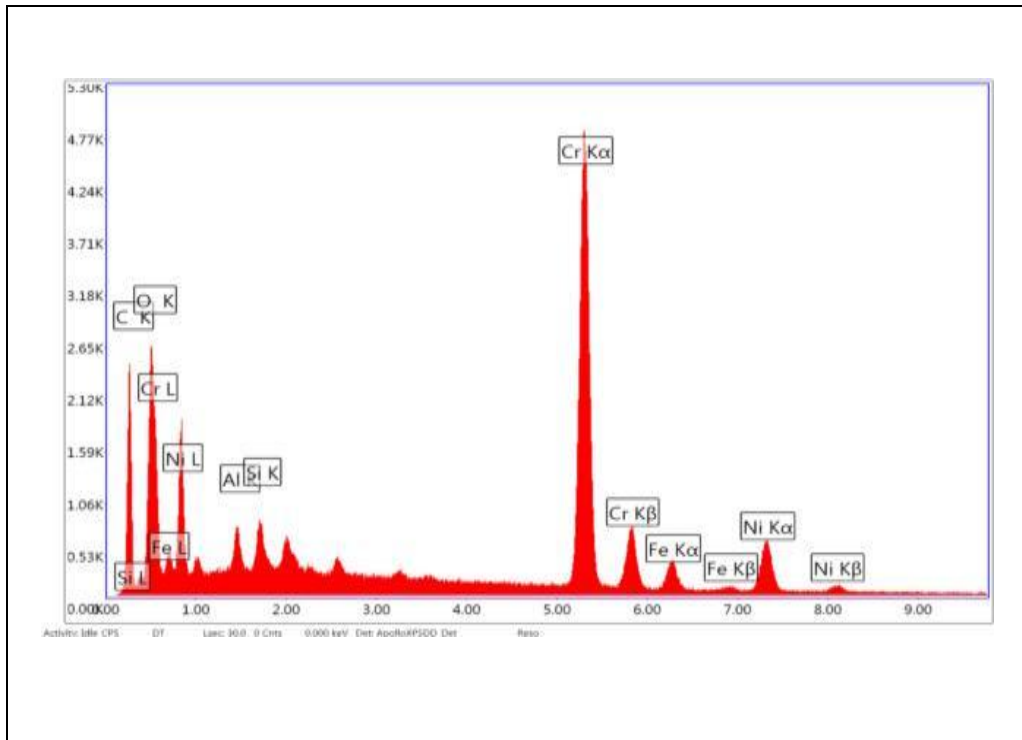
Şekil 3.11: ESD yöntemi kullanılarak çelik üzerine yapılmış $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ kaplamanın yan-kesit görüntüsü.

SEM de elde edilen yüzey görüntülerinden de anlaşılabacağı üzere morfolojik yapı ESD kaplamanın genel karakteristiğini yansıtmaktadır. Elektrottan ergimiş halde (eroziv) olan kütlenin altlık üzerine depozit olurken oluşan splash (depozit damlacığı) görüntüleri ve depozit damlacıkların dinamik kuvvetlerin etkisi altında etrafa saçılıp katılan partiküller görülmektedir. Ayrıca görüntülerden de anlaşılmaktadır ki altlığı tamamen örten bir kaplama tabakasının varlığı Çelik altlık üzerine başarılı bir şekilde ESD yöntemi ile $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ kaplama gerçekleştirilmiştir.

Şekil 3.12'de görüldüğü üzere ESD yöntemi ile 5 yüzeyi $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ kaplanan numune yüzeyinde yapılan SEM/EDX analizi sonucunda O, C, Al, Si, Cr, Ni ve Fe elementleri belirlenmiştir. SEM görüntüsü alınan alan, Analiz sonuçları ve elementlerin yüzde oranları Tablo 3.3'de verilmiştir. EDX grafiği Şekil 3.13'da görülebilir.



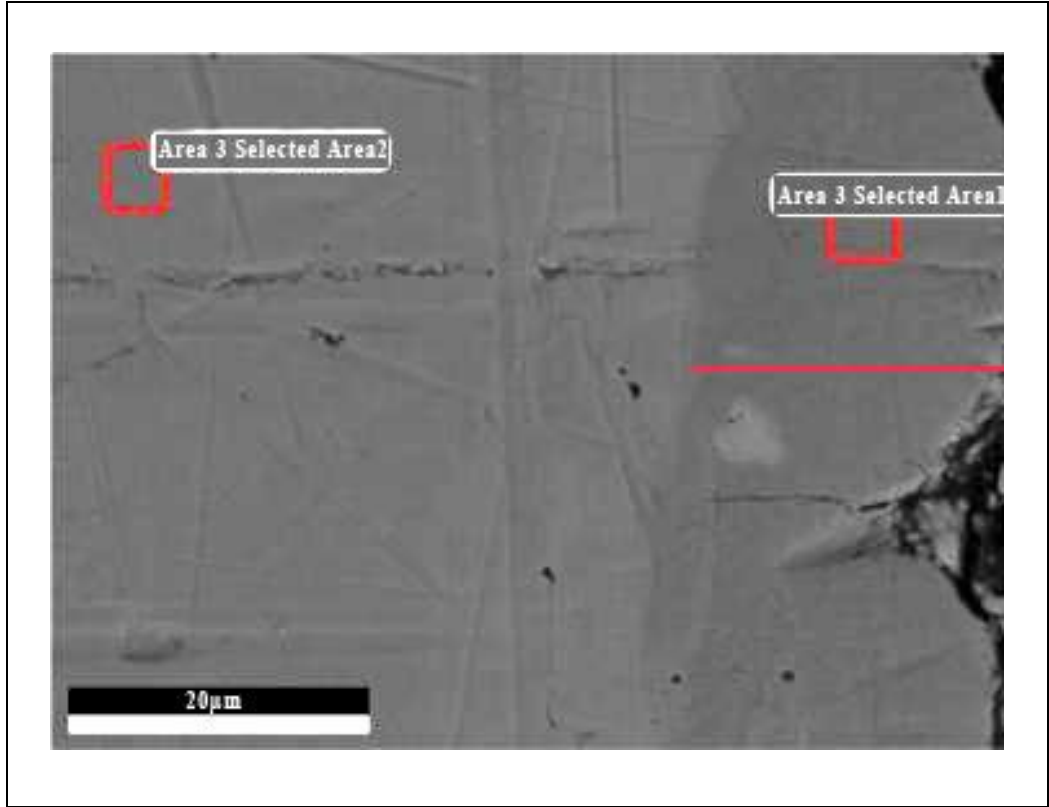
Şekil 3.12: ESD yöntemi kullanılarak çelik üzerine yapılmış Cr₃C₂-NiCr kaplamanın EDX analizi için alınan Yüzey SEM görüntüsü (Area7 Full Area1).



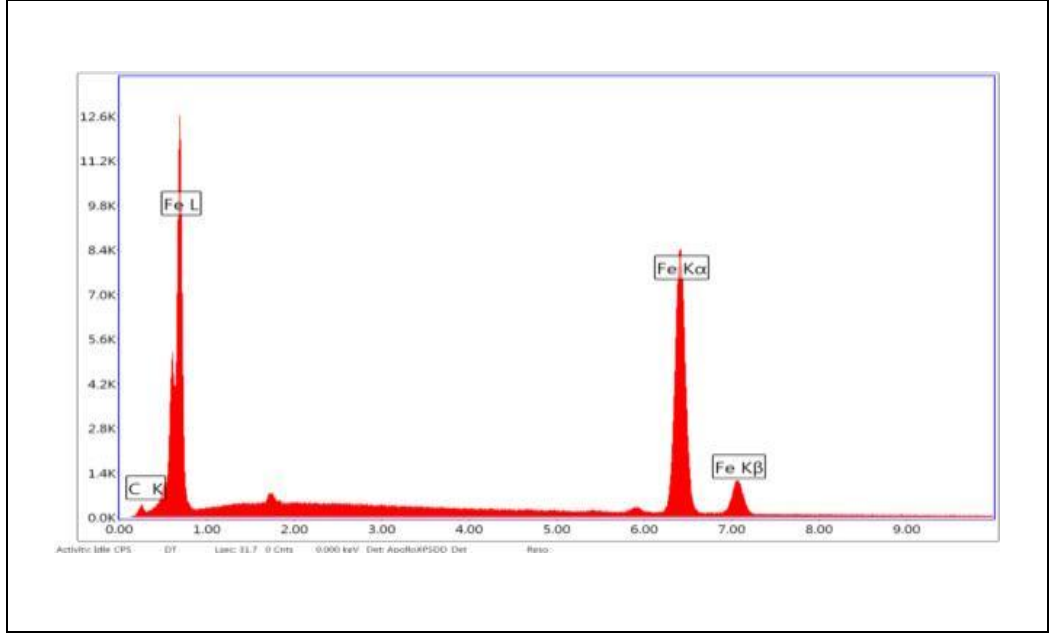
Şekil 3.13: ESD tekniğiyle Cr₃C₂-NiCr kaplanmış olan numunenin SEM/EDX analizi (Area7 Full Area1).

Tablo 3.4: ESD tekniğiyle Cr₃C₂-NiCr kaplanmış olan numunenin SEM/EDX Analizi Oransal Sonuçları.

Element	Ağırlık (%)	Atomik (%)
C	20.42	48.87
O	5.84	10.5
Al	1	1.06
Si	1.09	1.12
Cr	51.16	28.29
Fe	5.22	2.69
Ni	15.27	7.48
Total	100.00	100.00



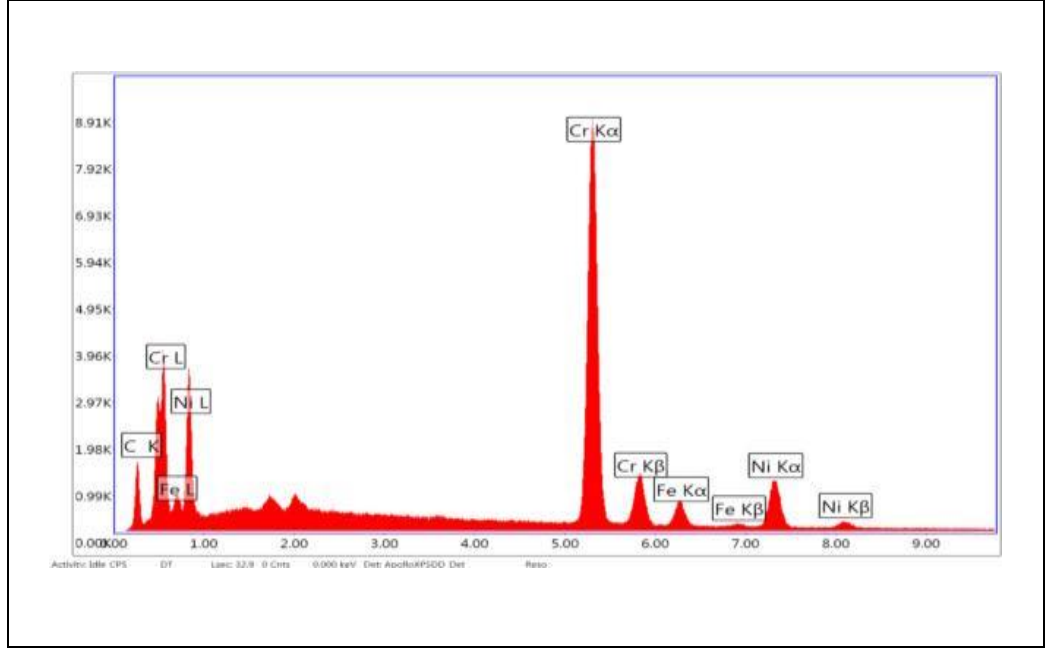
Şekil 3.14: ESD yöntemi kullanılarak elik üzerine alaşımlanmış Cr₃C₂-NiCr kaplanmış numunenin EDX analizi için alınan yan kesit SEM görüntüsü.



Şekil 3.15: ESD tekniğiyle Cr_3C_2 -NiCr kaplanmış olan numunenin SEM/EDX analizi (Area2) - St37 çelik altlık.

Tablo 3.5: ESD tekniğiyle Cr_3C_2 -NiCr kaplanmış olan numunenin Yan Kesitten Altlık SEM/EDX Analizi Oransal Sonuçları.

Element	Ağırlık (%)	Atomik (%)
C	3.54	14.59
Fe	96.46	85.41
Total	100.00	100.00



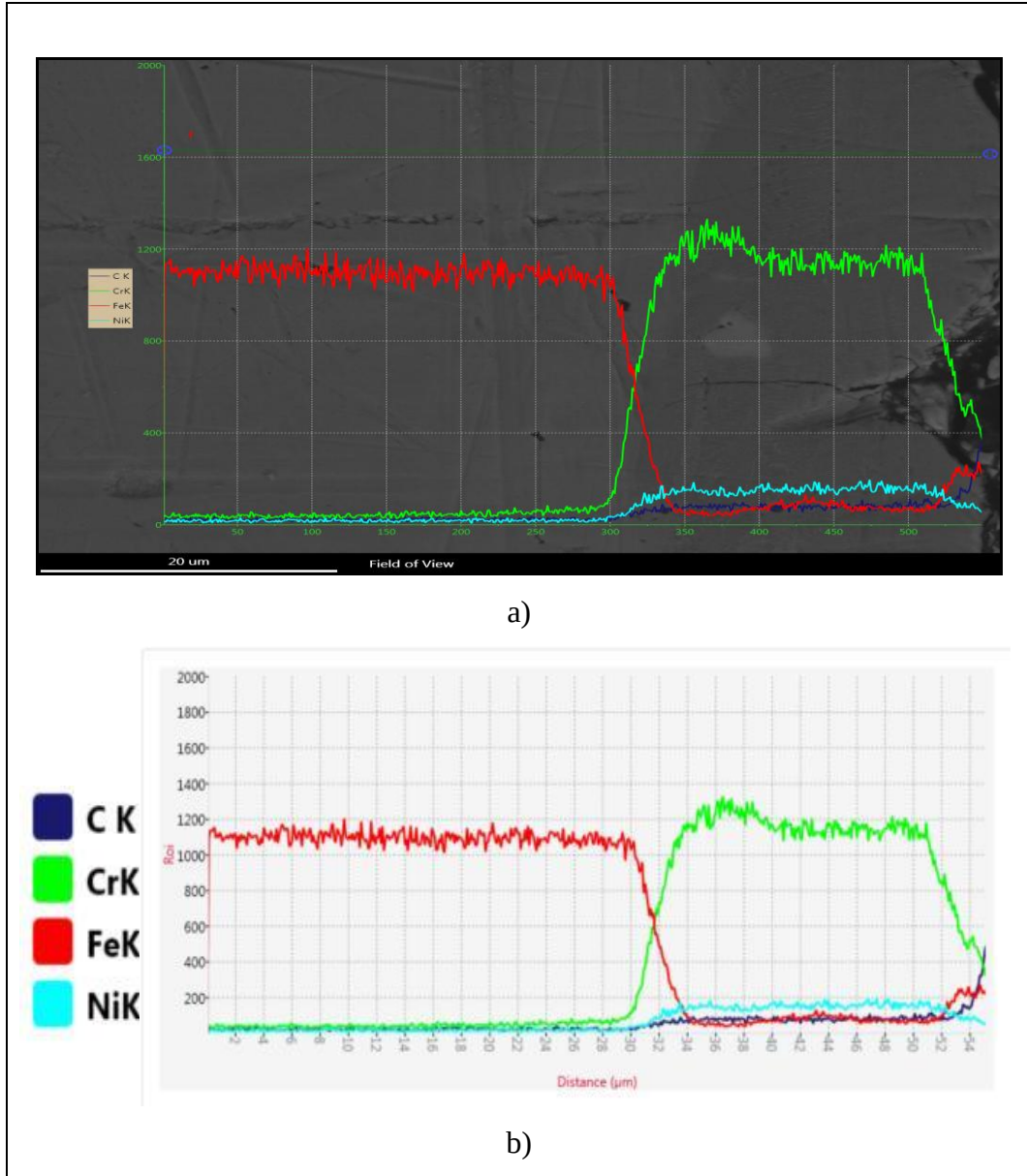
Şekil 3.16: ESD tekniğiyle Cr_3C_2 -NiCr kaplanmış olan numunenin SEM/EDX analizi (Area1) - Cr_3C_2 -NiCr Kaplama.

Tablo 3.6: ESD tekniğiyle Cr_3C_2 -NiCr kaplanmış olan numunenin Yan Kesitten Kaplama SEM/EDX Analizi Oransal Sonuçları.

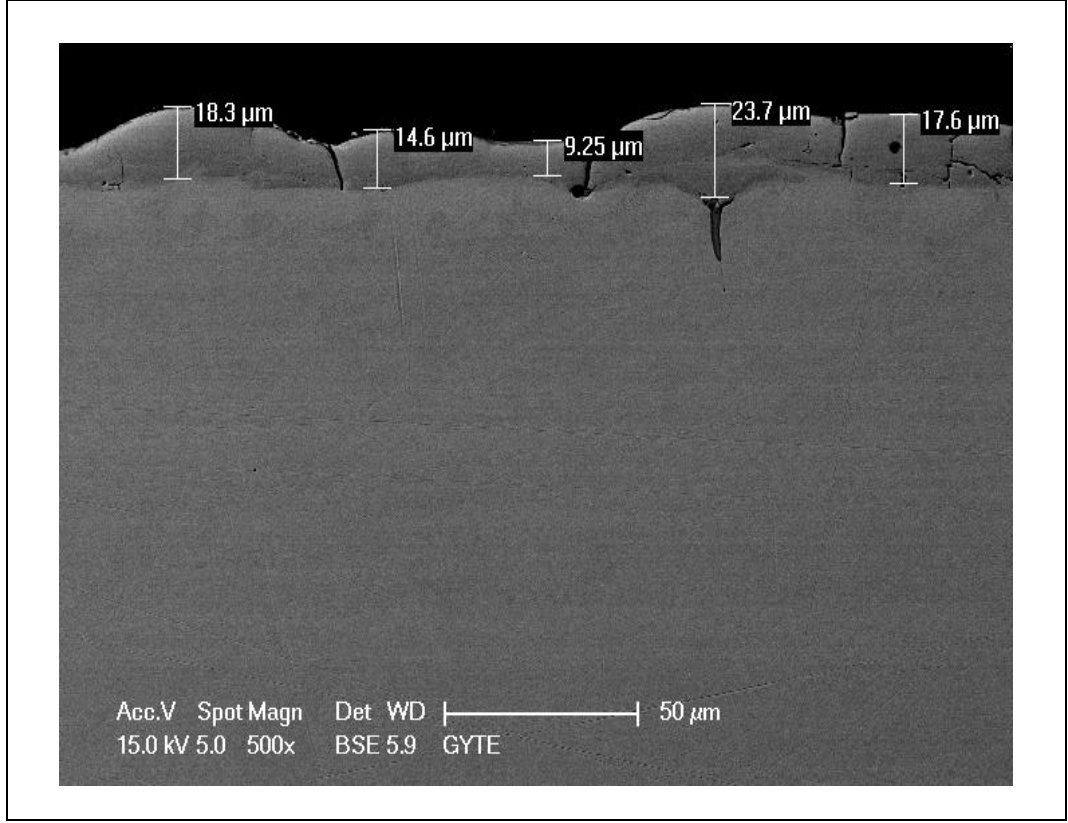
Element	Ağırlık (%)	Atomik (%)
C	9.87	32.85
Cr	62.95	48.41
Fe	6.51	4.66
Ni	20.67	14.08
Total	100.00	100.00

Şekil 3.11'de, uygulanan alaşım kaplamanın yan kesit görüntüsü sunulmaktadır. Görüntüden çelik altlık üzerinde deposit olan yaklaşık 15–20 micrometre kalınlığında bir kromkarbür-nikelkrom kaplamanın mevcut olduğu anlaşılmaktadır. Altlık ile kaplama arasında üniform bir ara yüzeyin (interface) de olduğu görülmektedir. Bütün bunlar çelik altlık ile üzerinde alaşımlanan kromkarbür-nikelkrom metalurjik bir bağ oluşturduğunu işareti olup ESD yöntemine özgü bir sonuçtur.

Şekil 3.17'de görüldüğü üzere ESD yöntemi ile yapılan $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ kaplanmış olan numuneden alınan kesit üzerinde ayrıca line-EDX taraması uygulanmış ve yüzeyden itibaren altlığa doğru elementlerin dağılımının ne şekilde değiştiği belirlenmiştir. Buna göre en üstteki katmanda Cr ve Ni'nin miktar olarak daha fazla olduğu ve altlığa doğru azaldığı görülmektedir. Altlıkla üst katman arasındaki arayüzey (interface) birleşim kesitinden kaplamaya doğru Cr ve Ni oranının yükseldiği Fe ve C oranının ise üst katmana yaklaştıkça düştüğü ve üst katman içerisinde neredeyse bulunmadığı tespit edilmiştir.



Şekil 3.17: ESD yöntemiyle a) $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ kaplı numunenin, b) grafiksel Line-EDX görüntüsü.

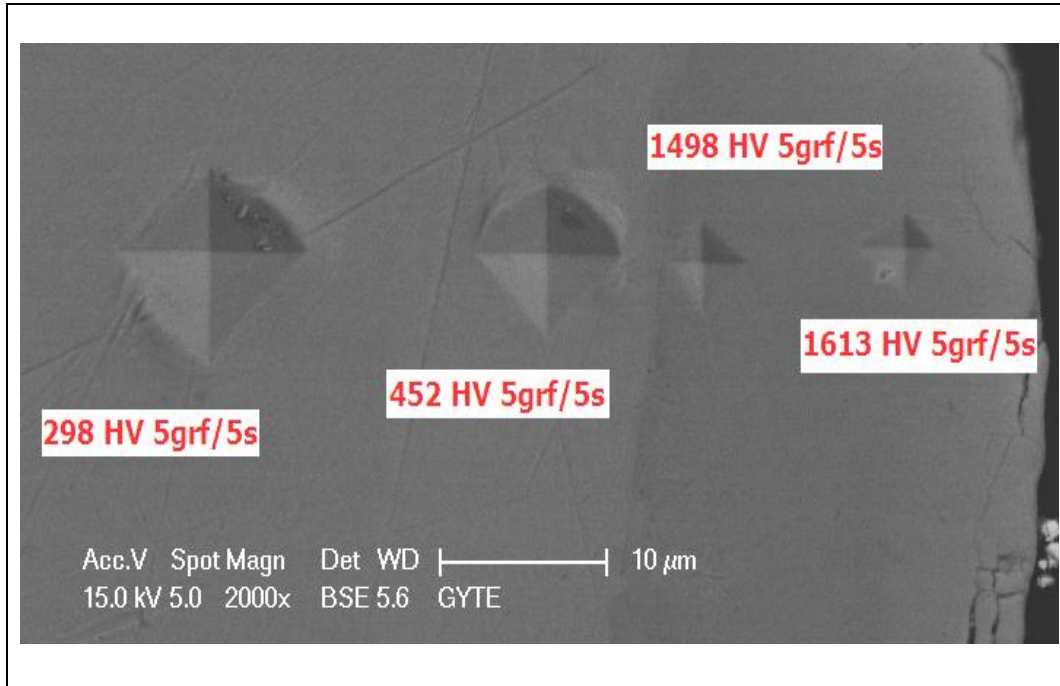


Şekil 3.18: ESD yöntemiyle Cr_3C_2 -NiCr kaplı numunenin kaplama kalınlıkları.

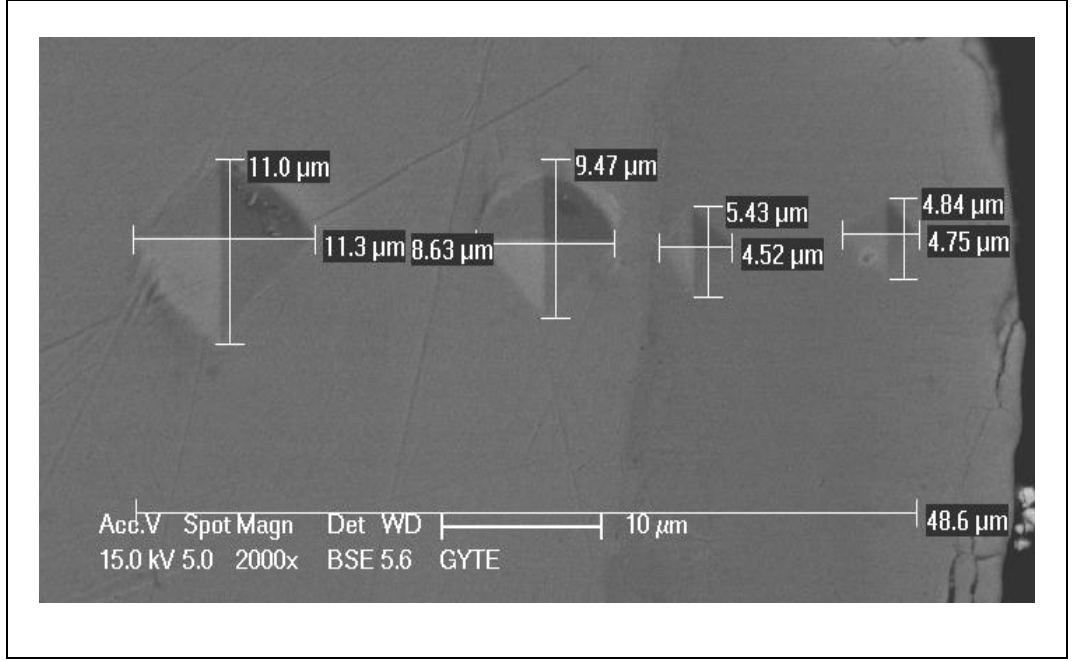
Kesitten alınan SEM görüntüleri ile de kaplama kalınlıkları ölçülmüştür. Mevcut numunede ESD kaplama ile ortalama 15 μm kaplama kalınlığı görülmektedir. Kaplamanın üst kısmında bir miktar gözenek ve çatlaklar olduğu kesitten alınan SEM görüntülerinde görülmektedir. ESD kaplamada kaplama boyunca çatlakların oluşumunun görülmesi ESD proseste çoğunlukla rastlanan bir sorun olup proses esnasında oluşan ısıl genleşmeler farkının bir sonucu olduğu düşünülmektedir. Bu nedenle Relatif Kütle Transferi grafiklerinden anlaşılabileceği üzere, ESD proseste bir numunenin yüzeyi üzerinde defalarca (kat kat) kaplama yaparak kaplama kalınlığını aşırı arttırabilme metodu her zaman geçerli değildir. Ayrıca kaplamanın EDX analizi gözden geçirilirse kaplama kalınlığı boyunca altlık yüzeyin kimyasal yapısının değiştiği görülmektedir. Kaplamanın üst kısmı, biriktirilen (deposit edilen) elektrot malzemece zenginleştikçe kütle transferi de bir sabit bir hale ulaşacaktır ve artık artmayacaktır.

3.7. Kaplamaların Mikro Sertlik Sonuçları

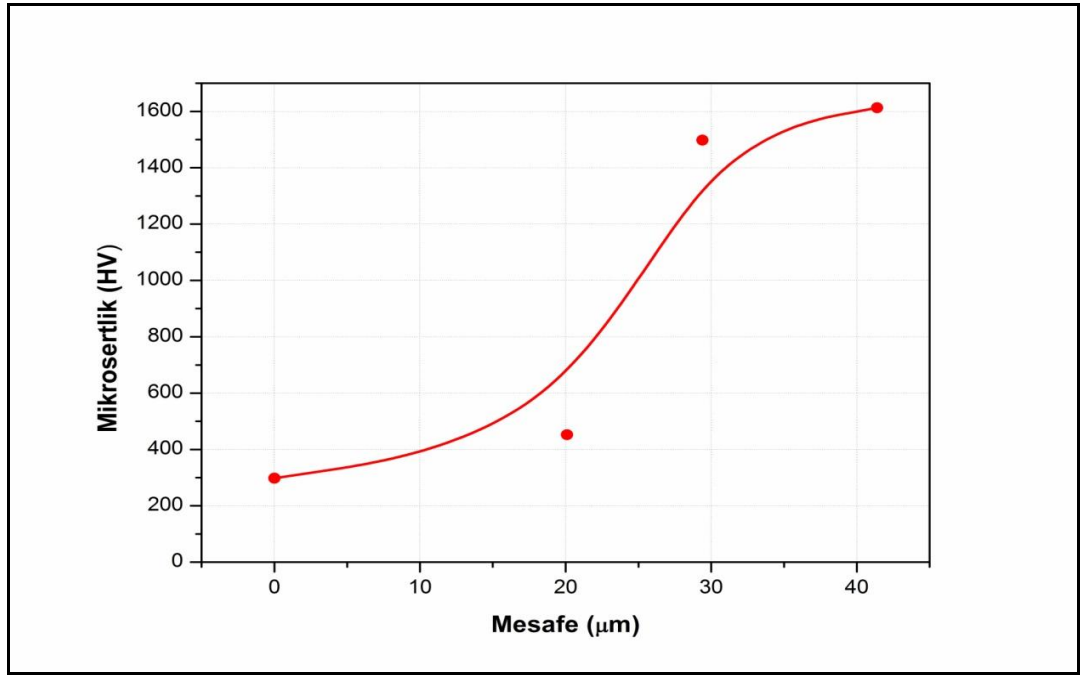
Sertlik ölçümünde Vickers mikro sertlik testi yöntemiyle sertlikler kaplama kalınlığı boyunca ölçülmüştür. Kaplama işlemi sonrası sertlik değerlerinde büyük bir artış meydana gelmiştir. Altlıkta 298HV ve 452HV olan sertlik değerleri kaplama ile altlık arasındaki bölgede (interface-ara yüzey) 1498HV olarak ölçüldü. Kaplama bölgesinde ise 1613HV gibi yüksek bir değere ulaşarak ESD kaplama ile sertlik çeliğe göre 5 katından fazla artış sağladı.



Şekil 3.19: ESD yöntemiyle $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ kaplı çeliğin sertlik ölçüm değerleri.



Şekil 3.20: ESD yöntemiyle Cr_3C_2 -NiCr kaplı çelikten elde edilen sertlik izleri (elmas uç piramit koniğin) SEM görüntüsü.



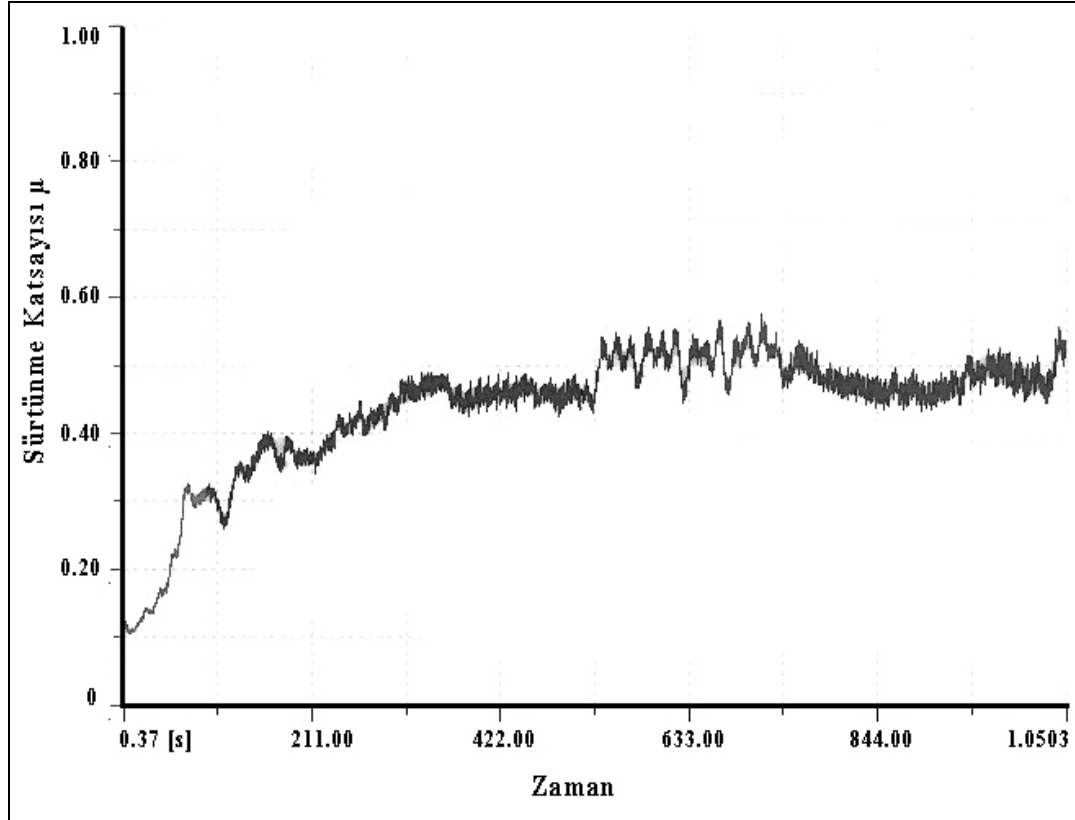
Şekil 3.21: ESD yöntemiyle Cr_3C_2 -NiCr kaplanmış olan çelik için sertlik-mesafe değişim grafiği.

Tablo3.7: ESD yöntemiyle Cr_3C_2 -NiCr kaplı çeliğin sertlik değerleri.

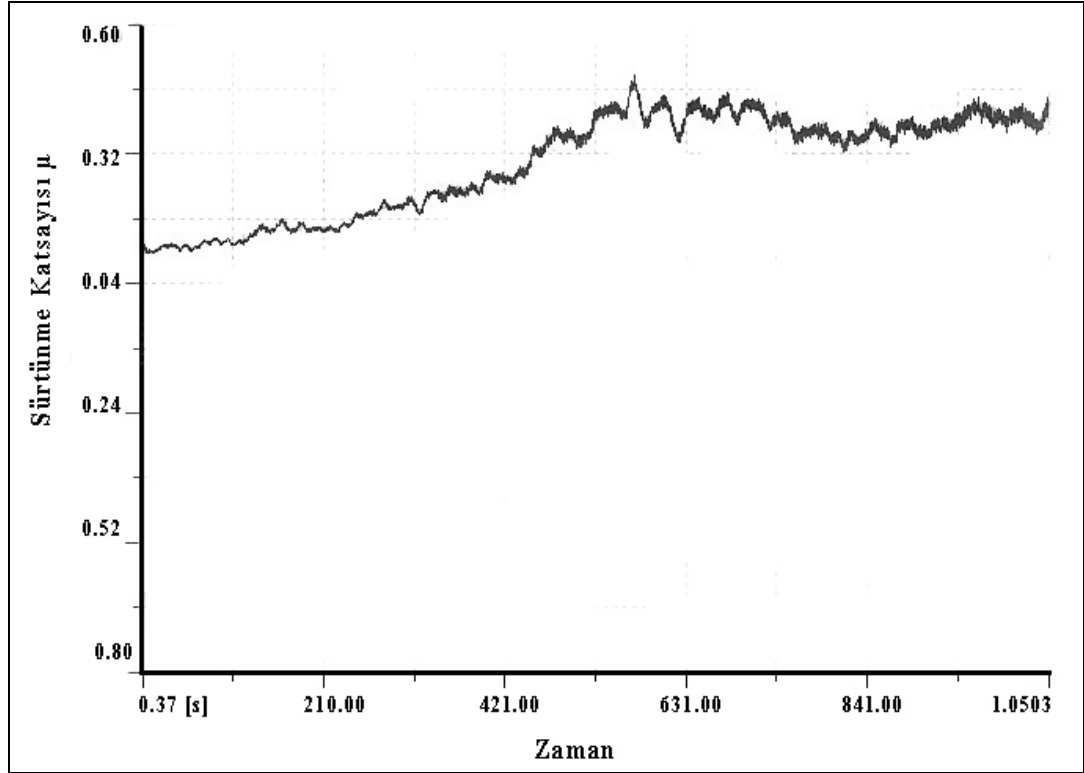
St37 (altlık)	St37+ESD(interface)	St37+ESD(kaplama)
289 HV	1492 HV	1613 HV

3.8. Kaplamaların Sürtünme Katsayıları Ve Aşınma Miktarları

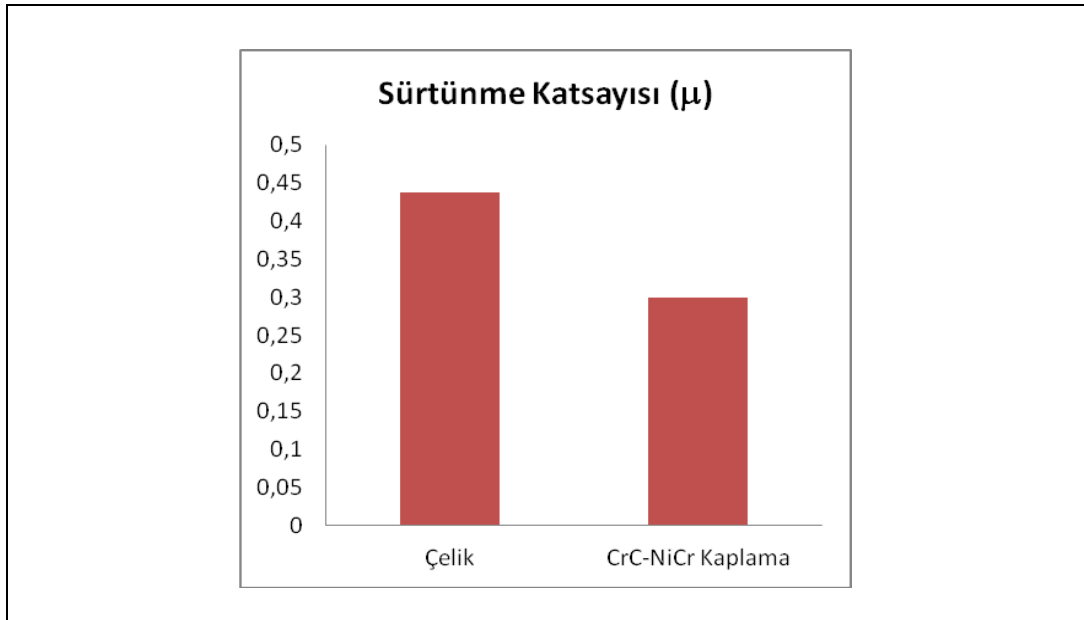
ESD Kaplama sayesinde malzemenin yüksek yük altındaki sürtünme özelliklerinde iyileşme sağlanır. Yaptığımız deneysel çalışmalar sonrasında da ESD kaplama yöntemiyle kromkarbür-nikelkrom kaplı numunelerin sürtünme katsayılarında ve aşınma oranlarında azımsanmayacak oranda bir düşüş olduğu gözlemlendi. Altlık malzeme olarak kullanılan çeliğin sürtünme katsayısı $\mu_{\text{çelik}} = 0,438$ iken kaplama sonrası bu değer $\mu_{\text{kaplama}} = 0,300$ ye düşmüştür. Aşınma miktarındaki değişim ise altlık çelik malzeme için $371,6\mu\text{m}^2$ olan değer, $365,6\mu\text{m}^2$ ye düşmüştür.



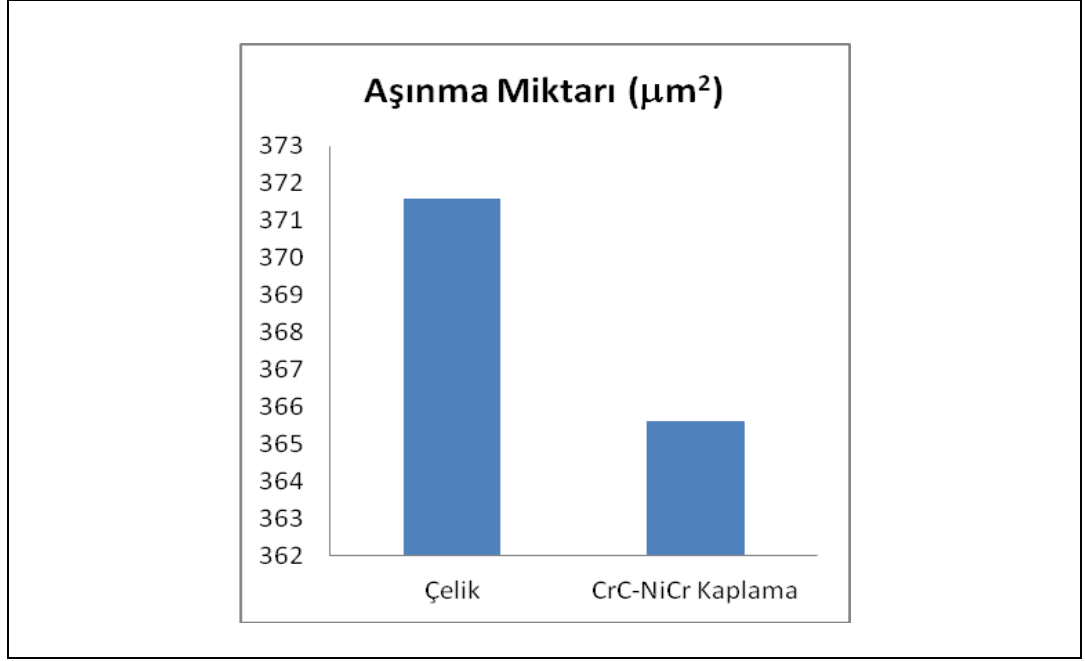
Şekil 3.22: ESD yöntemiyle Cr_3C_2 -NiCr kaplı numunenin altlık sürtünme katsayı grafiği.



Şekil 3.23: ESD yöntemiyle Cr_3C_2 -NiCr kaplı numunenin kaplama bölgesi sürtünme katsayı garfı.



Şekil 3.24: ESD yöntemiyle Cr_3C_2 -NiCr kaplı numunenin altlık ve kaplamanın sürtünme katsayısı değişim grafikleri.



Şekil 3.25: ESD yöntemiyle Cr₃C₂-NiCr kaplı numunenin altlık ve kaplamanın aşınma miktarındaki değişim grafikleri.

Tablo3.8: ESD yöntemiyle Cr₃C₂-NiCr kaplı numunenin sürtünme katsayıları ve aşınma miktarları.

Malzeme	Sürtünme Katsayıları (μ)	Aşınma Miktarı (µm ²)
Çelik (St37)	0,438	371,6
Cr ₃ C ₂ -NiCr Kaplama	0,300	365,6

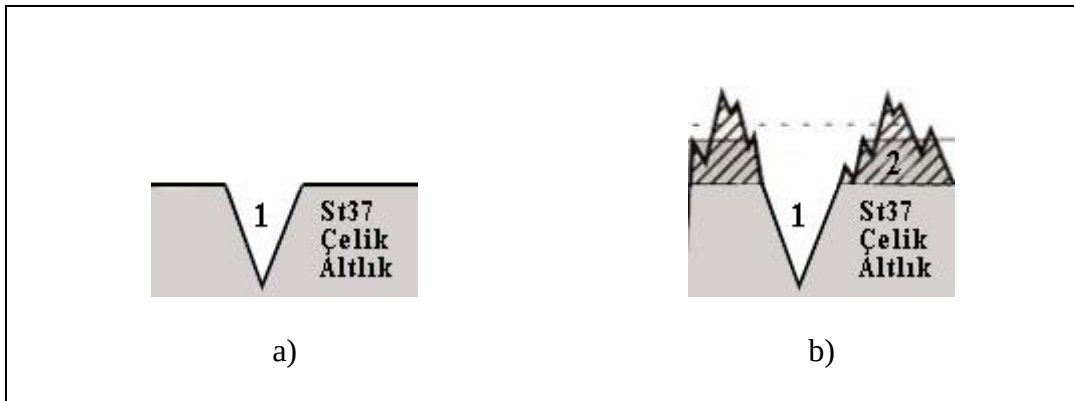
Aşınma birbiriyle temasta olan iki komponentin birbirine göre relatif hareket yaptığında oluşan yüzey hasarı olarak tanımlanılabilir. Hareket eden komponentlerin arasındaki boşluğun artmasına, istenmeyen hareket serbestliğine ve bununla bağlantılı olarak hassasiyetin azalmasına yol açar. Titreşimle beraber mekanik yüklemenin artmasına ve aşınmanın şiddetlenmesine neden olur. Bu durum bazen yorulma kırılması ile beraber gelişir.

Zımparalama ve parlatma gibi bazı durumlarda aşınma, istenen bir prosestir. Ancak, aşınma denildiğinde esas konu, oluşan hasar prosesi ve bunun sonucunda meydana gelen malzeme kaybıdır. Bu endüstrinin ana problemidir ve endüstrileşmiş uluslara aşınmanın direkt maliyetinin brüt ulusal ürünün %1-4'ü arasında değiştiği tahmin edilmektedir.

Aşınmayı etkileyen faktörler; ilk yüzey durumu (topoğrafya), yük altında pürüzlerin davranışı, yükleme ve kayma hızı gibi işlem koşullarıdır.

Çok iyi parlatılmış yüzeyler bile mükemmel pürüzsüzlüğe ve düz yüzeye sahip olamazlar, değişen oranlarda yüzey pürüzlülüğü içerirler. İki yüzey karşılıklı yüklendiğinde, sadece yüksek noktalardan ya da pürüzlüklerden temasa geçer. Gerçek temas alanı görünen temas alanından çok daha küçük olduğundan, pürüzlükler çok yüksek yüklemeye maruz kalırlar. Yüzeyler arasındaki relatif hareket aşınmaya yol açar. Aşınma hızı; yükleme, relatif hız ve yüksek kayma gerilmeleri altındaki pürüzlere yakın malzemenin davranışıyla kontrollüdür.

Şekil 3.26 a'da görüldüğü üzere St37 çelik altlık için aşınma miktarı ölçümünde numune yüzeyi pürüzsüz olduğu için cihaz sadece aşınmış bölge olan 1 nolu bölgenin ölçümünü yapar. Ancak Şekil 3.26 b'de görüldüğü üzere ESD yöntemiyle kaplanmış numunelerin yüzeyleri kaplama morfolojisinden dolayı pürüzsüzlüğe ve düz yüzeye sahip olamazlar. Bu yüzden aşınma testinde ölçüm sırasında cihaz kaplamanın yüksek noktalarından ya da pürüzlüklerinden (2.bölge) temasa geçer. Dolayısıyla ölçülen alan daha fazla (1 nolu +2 nolu) olur. Bundan dolayı ESD kaplamanın genel bir karakteristiği olan kaba ve pürüzlü yüzeyin aşınma deneyi sonuçlarına etki ettiği ve bu yüzden elde edilen daha yüksek bir aşınma direncinin elde edilebileceği düşünülmektedir.



Şekil 3.26: ESD yöntemiyle $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ kaplı numunenin a) altlık ve b) kaplamanın aşınma davranışları.

4. SONUÇLAR ve YORUMLAR

Bu çalışmada ESD alaşımlama yöntemi kullanılarak St37 düşük karbonlu çelik yüzeyler üzerine başarılı bir şekilde $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ kaplamalar tatbik edilmiş olup yapılan çalışmadan aşağıdaki sonuçlar çıkarıldı.

ESD alaşımlama yönteminde ağırlık artışındaki değişimler incelendiğinde elektrottaki (anot) erozyon ile altlıktaki (katot) ağırlık kazanımı arasında bir uyum söz konusudur. Kaplama sayısını yani uygulanan toplam süreyi arttırmak ile numune yüzeyi üzerine daha fazla miktarda elektrot transferi olduğundan daha fazla ağırlık artışı elde edebilmek mümkündür. Ayrıca ağırlık kazanımı ile uyumlu şekilde kaplama kalınlığını da arttırmak mümkün olabilmektedir. Ancak yapılan deneysel çalışmalarda en uygun ağırlık artışı ve kaplama kalınlığı değeri 100A-200 μs akım değerlerinde elde edildi. Uygulanan akım darbe (pulse) süresini 300 μs çıkarılması durumunda aşağıda açıklanan nedenlerden dolayı ağırlık artışında bir düşüş ve dolayısıyla kaplama kalınlığı da beklenen artış görülmemektedir.

ESD proses açık hava koşullarında uygulanmıştır. Bu nedenle, Xray analizlerinde tespit edilmeyecek kadar az bir miktar da olsa (EDX analizlerinde görülen oksijen), elde kaplamaların üst kısımlarında oksitler oluşmaktadır. Bu oksitlerin belli bir süreden (paso) sonra uygulanan kıvılcımların (spark) kaplama kalınlığını arttırmaktan ziyade mevcut kaplamaya zarar vermeye sebep olduğu düşünülmektedir.

Uygulanan 300 μs gibi bir uzun darbe (pulse) süresinin sahip olduğu yüksek enerjiden dolayı hem altlık malzemeyi ve hem de elektrot malzemeyi ergitmekten ziyade çoğunlukla buhar fazına geçirdiği dolayısıyla elektrottan erozyona uğrayan kütlenin altlığa transfer olmak yerine etrafa saçıldığı ve bu nedenle beklenen ağırlık artışının gerçekleşmediği anlaşılmaktadır.

ESD alaşımlama yöntemiyle St37 çelik altlık üzerinde biriktirilen $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ kaplamanın EDX analiziyle üst yüzey morfolojisi incelendiğinde Ni, Cr, C, Fe ve elementlerin varlığı, kaplama ve altlık arasındaki metalürjik esaslı alaşım oluşumunu göstermektedir.

Kaplama yüzeyinden de görüldüğü gibi ESD işlemi sırasında elektrottan altlığa küresel kütle transferi mekanizması, düzensiz ve kaba görünüm olarak karakterize edilir. Bu işlem, ESD işleminin karakteristik bir özelliğidir. SEM görüntülerinde de kaplamanın uygulanması esnasında elektrotun ucunda meydana gelen küresel mikrodamlacıkların yüzeye çarpması sonucunda yüzeyde saçılmalar (splash) olduğu görülmektedir. Bu olay aslında kaplamadaki pürüzlülüğün sebebidir.

ESD alaşımlama yöntemiyle St37 çelik altlık üzerinde biriktirilen Cr_3C_2 -NiCr kaplamanın SEM de elde edilen yandan kesit görüntülerine bakıldığında tipik ESD kaplama görüntüsü olan 3 adet sürekli bölge vardır. Numunenin enine kesiti boyunca bu üç adet sürekli bölgenin (kaplama tabakası, geçiş bölgesi, altlık) olduğu görülmektedir. Kaplama ve altlık arasında sürekli bir geçiş bölgesi (transition zone) bulunmaktadır.

EDX (Energy Dispersive X-ray Spectrum) çizgi tarama tekniği ile (line-EDX) kaplama ve alt-tabaka içindeki Ni, Cr, C, Fe gibi elemanların dağılımı tespit edildi. Line-EDX ile belirlenen elemental grafiğe göre Ni, Cr miktarı kaplama yüzeyinden alt-tabakaya doğru azalır. Fe, C ise altlık malzemeye doğru artar. Bunun bir sonucu olarak, orada bir interdifüzyon (geçiş) bölgesi ve ESD işlemi esnasında altlık ve kaplama malzemesinin arasında dar bir karıştırma ve ergitme tabakasının varlığını gösterir.

ESD kaplı yüzey için X-ışını kırınım spektrumu incelendiğinde kaplanan numuneden elde edilen kaplama tabakasının altlık çelik ile Cr_3C_2 -NiCr elektrotun bir alaşımdan ibaret olduğundan dolayı yapıda sadece α -Fe (ferrit), Cr_7C_3 , NiCrFe ve Martensite (Fe,C) fazları tesbit edilmiştir. Cr_3C_2 -25NiCr elektrot kullanıldığından kromkarbür (Cr_7C_3) fazının ortaya çıkmasında ve Martenzit fazının ise elde edilen alaşım tabakasının ani soğuması yani hızlı katılaşmasının bir sonucu olduğu aşıkardır.

ESD alaşımlama yöntemiyle Cr_3C_2 -NiCr kaplı numunenin sertlik ölçümünde mesafeye bağlı olarak sertlik değerleri incelendiğinde tepe sertlik değeri 1613HV olarak kaplama bölgesinde ölçüldü. Daha sonra altlığa doğru olan ölçümlerde 1498 HV geçiş bölgesinde(transition zone) ve 452HV ile 298HV ise altlık malzemede ölçülerek kademeli olarak bir düşüş olduğu gözlemlendi. ESD kaplama ile sertlik artışı çeliğe göre 5 katından fazla artış sağlanmıştır. Bunun nedeninin kaplama tabakasında Cr_7C_3 ve Martenzit (Fe,C) fazlarının varlığından dolayı olduğu düşünülmektedir.

Aşınma testi ESD alaşımlama yöntemiyle $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ kaplı numuneye ve çelik altlığa kuru ortamda oda sıcaklığında alümina (Al_2O_3) bilyenin numune yüzeyini aşındırmasıyla gerçekleştirilmiştir. ESD alaşımlama yöntemiyle çelik üzerinde elde edilen $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ kaplamanın aşınma direncini arttırdığı görülmüştür. Aşınma miktarı çelik altlık için 5N yük altında $371.6\mu\text{m}^2$ diğer yandan 5N yük altında ESD kaplı numune $365,6\mu\text{m}^2$ değerini vermiştir. ESD kaplamanın genel bir karakteristiği olan kaba ve pürüzlü yüzeyin aşınma deneyi sonuçlarına etki ettiği ve bu yüzden elde edilen daha yüksek bir aşınma direncinin elde edilebileceği düşünülmektedir. Aşınma miktarının yanı sıra Sürtünme Katsayısı ortalama değerleri sırasıyla hem kaplanmış hem de kaplanmamış numuneler için $0,300\mu$ ve $0,438\mu$ katsayıları elde edilmiştir. $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ kaplanmış numuneler için, sürtünme katsayıları, kaplanmamış numunelere oranla daha düşük olduğu gözlenmiştir.

ESD prosesin diğer parametreleri üzerinde durularak yapılacak bir çalışma ile yüzey pürüzlüğünün azaltılabileceği ve böylece elde edilenden daha az boşluklu bir yüzey ile istenen düşük aşınma oranlarına ulaşılabileceği aşikârdır. Bu yönüyle de bu çalışma, konu ile ilgili gelecekteki ESD kaplama çalışmalara yardımcı olabilir.

KAYNAKLAR

- [1] Johnson R.N., Sheldon G.L., (1986), “Advances in the electrosark deposition coating process”, Surface and Coatings Technology, 36 (1), 446-454.
- [2] Lide, D.R., (1998), “Handbook of Chemistry and Physics”, 52th Edition, Boca Raton.
- [3] Web 1, (2013), http://www.hardmaterials.de/html/_crystal_structures.html, (Erişim Tarihi: 14/06/2013).
- [4] Chattopadhyay R., (2001), “Surface Wear”, Analysis, Treatment, and Prevention, 289, 228-229.
- [5] Tracey V.A., (1992) “Nickel in Hardmetals” ,Refractory Metals and Hard Materials, 11 (3), 137-149.
- [6] Kayuk, V.G., Maslyuk V.A., Kostenko A.D., (2003) “Tribological properties of hard alloys based on chromium carbide”, Powder Metallurgy and Metal Ceramics, 42(5), 257-261.
- [7] Romero, J., Lousa A., Martinez E., Estave J., (2003), “Nanometric chromium/chromium carbide multilayers for tribological applications”, Surface and Coatings Technology, 163, 392-397.
- [8] Sidhu, T.S., Prakash S., Agrawal R.D., (2006), “Characterizations and hot corrosion resistance of Cr₃C₂-NiCr coating on Ni-base superalloys in an aggressive environment”, Thermal Spray Technology, 15 (4), 811-816.
- [9] Espallargas, N., Berget J., Benedetti A., (2008), “Cr₃C₂-NiCr and WC-Ni thermal spray coatings as alternatives to hard chromium for erosion-corrosion resistance”, Surface and Coatings Technology, 202 (8), 1405-1417.
- [10] .Murthy J., Gopinath K., Venkataraman B., (2010), “Characterisation of HVOF sprayed Cr₃C₂-50(Ni₂₀Cr) coating and the influence of binder properties on solid particle erosion behaviour”, Surface and Coatings Technology, 204, 3975–3985.
- [11] Shang L., Feng D., Luo H., (2006), “Development of New Wear-Resistant Surface Coating at Elevated Temperature”, Iron and Steel Research International, 13 (5), 37-40.59.
- [12] Magnani, M., Suegama P.H., Espallargas N., (2009), “Corrosion and wear studies of Cr₃C₂NiCr-HVOF coatings sprayed on AA7050 T7 under cooling”, Thermal Spray Technology, 18 (3), 353-363.

- [13] Rawdon H.S., (1924), "Discussion, American Institute of Mining and Metallurgical Engineers Transactions", 70, 37-38.
- [14] Lazarenko B.R., Lazarenko N.I., (1944), "Electric Erosion of Metals", Gasenergoizdat, Moscow Leningrad, 1.
- [15] Lazarenko B.R., Lazarenko N.I., (1964), "Electro-Spark Machining of Metals", Translated by Consultants Bureau, New York.
- [16] Welsh N.C., (1957), "Frictional Heating and Its Influence on the Wear of Steel", Journal of Applied Physics, 28, 9960-968.
- [17] Welsh N.C., (1958), "Surface Hardening of Non-ferrous Metals by Spark Discharge, Nature", Wear, 4614, 1005-1006.
- [18] Welsh N.C., (1959-60), "Surface-Hardening Metals", Journal of Institute of Metals, 88, 103-111.
- [19] Welsh N.C., (1962), "P.E. Watts, The Wear Resistance of Spark-Hardened Surfaces", Wear, 5, 289-307.
- [20] Agarwal A., Dahotre N.B., (1998), "Pulse electrode deposition of superhard boride coatings on ferrous alloy", Surface and Coatings Technology, 106 (2-3), (242-250).
- [21] Korkmaz K., (2008), "Elektrospark Biriktirme Yöntemiyle Mikro Alaşımli Çeliklerin Tungsten Karbür İle Kaplanması", Doktora Tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü.
- [22] Durdu S., Aktuğ S.L., Korkmaz K., (2013), "Characterization and mechanical properties of the duplex coatings produced on steel by electro-spark deposition and micro-arc oxidation", Surface and Coatings Technology, 236, 303–308.
- [23] Korkmaz K., Ribalko A.V., (2011), "Effect of Pulse Shape and Energy on the Surface Roughness and Mass transfer in the Electrospark Coating Process", Kovove Materialy - Metallic Materials, 49 (4), 265-270.
- [24] Lesnjak A., Tusek J., (2003), "Some characteristics of electrospark deposition", Z. Metalkunde, 94, 1260-1266.
- [25] James L., Reynolds Jr., (2003), "Electro-Spark Deposition", Advanced Materials and Process, 19, 35-37.
- [26] Priestley J., (1775), "The History and Present State of Electricity", 3th Edition, J.Johnson, London U.K.
- [27] Ribalko A.V., Sahin O., (2006), "A modern representation of the behaviour of electrospark alloying of steel by hard alloys", Surface and Coatings Technology, 201 (5), 1724-1730.

- [28] Ribalko A.V., Korkmaz K., Sahin O., (2008), "Intensification of the anodic erosion in electrospark alloying by the employment of pulse group", *Surface and Coatings Technology*, 202 (15), 3591-3599.
- [29] Frangini S., Masci A., Bartolomeo A., (2002), "Cr₇C₃ based cermet coating deposited on stainless steel by electrospark process: structural characteristics and corrosion behavior", *Surface and Coatings Technology*, 149, 279-286.
- [30] Zikin A., Hussainova I., Badisch C.E., Tomastik C., (2012), "Advanced chromium carbide-based hardfacings", *Surface and Coatings Technology*, 206 (19), 4270-4278.
- [31] Sahraoui T., Fenineche N.E., Montavon G., Coddet C., (2003), "Structure and wear behaviour of HVOF sprayed Cr₃C₂-NiCr and WC-Co coatings", *Materials and Design* 24 (5), 309-313.
- [32] Sidhu H.S., Sidhu B.S., Prakash S., (2010), "Wear characteristics of Cr₃C₂-NiCr and WC-Co coatings deposited by LPG fueled HVOF", *Tribology International*, 43 (5), 887-890.
- [33] Korkmaz K., Bakan H.I., (2010), "Process and properties of TiC_{0.7}N_{0.3} based cermet coating deposition on steel by electrospark deposition technique", *Kovove Materialy - Metallic Materials*, 48 (2), 153-158.
- [34] Ribalko A.V., Sahin O., Korkmaz K., (2009), "A modified electrospark alloying method for low surface roughness", *Surface and Coatings Technology*, 203 (23), 3509-3515.
- [35] Guilemany J.M., Espallargas N., Suegama P.H., Benedetti A.V., (2006), "Comparative study of Cr₃C₂-NiCr coatings obtained by HVOF and hard chromium coatings", *Corrosion Science*, 48, 2998-3013.
- [36] Morimoto J., Nobuyuki A., Kuriyama F., Michio T., (2001), "Formation of a Cr₃C₂/Ni-Cr alloy layer by an electron beam cladding method and evaluation of the layer properties", *Vacuum*, 62, 203-210.
- [37] Matthews S., James B., Hyland M., (2013), "High temperature erosion-oxidation of Cr₃C₂-NiCr thermal spray coatings under simulated turbine conditions", *Corrosion Science*, 70, 203-211.
- [38] Jianfeng L., Chuanxian D., (2000), "Improvement in the properties of plasma-sprayed chromium carbide coatings using nickel-clad powders", *Surface and Coatings Technology*, 130, 15-19.
- [39] Li J.F., Ding C.X., (2000), "Improvement in tribological properties of plasma-sprayed Cr₃C₂-NiCr coating followed by electroless Ni-based alloy plating", *Wear*, 240, 180-185.

- [40] Sidhu H.S., Sidhu B.S. , Prakash S., (2006), “Mechanical and microstructural properties of HVOF sprayed WC–Co and Cr₃C₂–NiCr coatings on the boiler tube steels using LPG as the fuel gas”, *Journal of Materials Processing Technology*, 171, 77–82.
- [41] Matthews S., Hyland M., James B., (2003), “Microhardness variation in relation to carbide development in heat treated Cr₃C₂–NiCr thermal spray coatings”, *Acta Materialia*, 51, 4267–4277.
- [42] Gang-Chang J., Chang-Jiu L., Yu-Yue W., Wen-Ya L., (2006), “Microstructural characterization and abrasive wear performance of HVOF sprayed Cr₃C₂–NiCr coating”, *Surface and Coatings Technology*, 200, 6749–6757.
- [43] Marcano Z., Lesage J., Chicot D., Mesmacque G., Puchi-Cabrera E.S., Staia M.H., (2008), “Microstructure and adhesion of Cr₃C₂–NiCr vacuum plasma sprayed coatings”, *Surface and Coatings Technology*, 202, 4406–4410.
- [44] Sheng H., Yuping W., Qian W., Guobing Y., Gaiye L., Wenwen G., Bo W., Wenmin G., (2013), “Microstructure and cavitation–silt erosion behavior of high-velocity oxygen–fuel (HVOF) sprayed Cr₃C₂–NiCr coating”, *Surface and Coatings Technology*, 225, 85–91.
- [45] Deyuan L., Chunlin H., Shuo S., Changsheng L., Qingkui C., (2013), “Microstructure and performances of graphite scattered Cr₃C₂–NiCr composites prepared by laser processing”, *Materials Letters*, 93, 304–307.
- [46] Zhenyi H., Qingyu H., Ping W., (2008), “Microstructure and properties of Cr₃C₂-modified nickel-based alloy coating deposited by plasma transferred arc process”, *Surface and Coatings Technology*, 202 (13), 2993–2999.
- [47] Murthy J.K.N., Bysakh S., Gopinath K., Venkataraman B., (2007), “Microstructure dependent erosion in Cr₃C₂–20(NiCr) coating deposited by a detonation gun”, *Surface and Coatings Technology*, 202 (1), 1–12.
- [48] Manpreet K., Harpreet S., Satya P., (2011), “Surface engineering analysis of detonation-gun sprayed Cr₃C₂–NiCr coating under high-temperature oxidation and oxidation–erosion environments”, *Surface and Coatings Technology*, 206 (2), 530–541.
- [49] Morimotoa J., Sasakia Y., Fukuharaa S., Abeb N., Tukamoto M., (2006), “Surface modification of Cr₃C₂–NiCr cermet coatings by direct diode laser”, *Vacuum*, 80 (11), 1400–1405.
- [50] Chatha S.S., Sidhu H.S., Sidhu B.S., (2012), “The effects of post-treatment on the hot corrosion behavior of the HVOF-sprayed Cr₃C₂–NiCr coating”, *Surface and Coatings Technology*, 206 (19), 4212–4224.

- [51] Matthews S., James B., Hyland M., (2009), “The role of microstructure in the high temperature oxidation mechanism of Cr₃C₂–NiCr composite coatings”, *Corrosion Science*, 51 (5), 1172–1180.
- [52] Mateos J., Cuetos J.M., Vijande R., Fernandez E., (2001), “Tribological properties of plasma sprayed and laser remelted 75/25 Cr₃C₂/NiCr coatings”, *Tribology International*, 34 (5), 345–351.
- [53] Zhenyu Z., Xinchun L., Jianbin L., (2007), “Tribological properties of rare earth oxide added Cr₃C₂–NiCr coatings”, *Applied Surface Science*, 253 (9), 4377–4385.

ÖZGEÇMİŞ

Hüseyin TOPAÇ 1985 yılında Tokat’da doğdu. 2006 yılında başladığı Kocaeli Üniversitesi (KOU), Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü’nü 2011 yılında başarıyla tamamlayarak, aynı yıl yüksek lisans eğitimine Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü (GYTE), Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Anabilim Dalında başladı. 2011 yılından bu yana Kartal Eğitim ve Araştırma Hastanesinde çalışmaktadır.