



Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

<https://dergipark.org.tr/tr/pub/yyufbed>



Araştırma Makalesi

TiC-C ile Kaplanan AISI 1040 Çelik Yüzeyinin Aşınma Özelliklerinin İncelenmesi

Musa KILIÇ^{*1}, Serkan GÖK², Oktay ADIYAMAN¹

¹ Batman Üniversitesi, Beşiri MYO, Makine Bölümü, 72060, Batman, Türkiye

² Batman Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Bilimler Enstitüsü, Malzeme ve İmalat Mühendisliği, 72060, Batman, Türkiye

Musa KILIÇ, [ORCID No: 0000-0001-5808-6917](#), Serkan GÖK, [ORCID No: 0000-0002-0957-9181](#),
Oktay ADIYAMAN, [ORCID No: 0000-0002-2674-3836](#)

*Sorumlu yazar e-posta: musa.kilic@batman.edu.tr

Makale Bilgileri

Geliş: 28.08.2023
Kabul: 24.11.2023
Online Nisan 2024

DOI: [10.53433/yyufbed.1351381](https://doi.org/10.53433/yyufbed.1351381)

Anahtar Kelimeler

Aşınma,
Kaplama,
Karbür,
Mikrosertlik,
Mikroyapı,
TiC

Öz: Bu çalışmada TIG (Tungsten Inert Gas) yöntemi ile AISI1040 çelik yüzeyi TiC ve farklı oranlarda (% 1,2,3,4,5) C takviyeli TiC-C tozu ile kaplanmıştır. Kaplama işlemi sonrası kaplama tabakasında oluşan sert karbür fazlarının mekanik özelliklerine etkisi (sertlik, aşınma) incelenmiştir. TiC-C kaplamanın aşınma özellikleri abrasiv aşınma testi uygulanarak belirlenmiştir. Testler ASTM G99 standardına uygun şekilde yapılmıştır. Aşınma bölgesi SEM-EDX ile mikroyapı görüntüleri çekilmiştir. Tüm kaplamalarda dendrit ve ötektik yoğun bir yapı görülmüştür. Kaplama tabakasında en düşük sertlik değeri N1 (TiC) 1156 HV_{0.5} iken en yüksek sertlik değeri ise N6 (TiC-%5C) 1351 HV_{0.5} olarak ölçülmüştür. Analiz sonucunda en düşük aşınma direnci N1 numunesinden elde edilirken en yüksek aşınma direnci ise N6 numunesinden elde edilmiştir. Analiz sonuçlarında N1 numunesinde sürtünme katsayısı 0.6 iken N6 numunesinde ise 0.2 olarak elde edilmiştir. Aşınma test analiz sonuçlarında artan C oranı ile mikrosertliğin ve aşınma direncinin arttığı, ağırlık kaybının ise azaldığı belirlenmiştir.

Investigation of Wear Properties of AISI 1040 Steel Surface Coated with TiC-C

Article Info

Received: 28.08.2023
Accepted: 24.11.2023
Online April 2024

DOI: [10.53433/yyufbed.1351381](https://doi.org/10.53433/yyufbed.1351381)

Keywords

Carbide,
Coating,
Microhardness,
Microstructure,
TiC,
Wear

Abstract: In this study, 1040 steel surface was coated with TiC and C-reinforced TiC-C powder at different rates (1,2,3,4,5%) by the TIG (Tungsten Inert Gas) method. The effect of hard carbide phases formed in the coating layer after the coating process on the mechanical properties (hardness, wear) was investigated. The wear properties of the TiC-C coating were determined by applying an abrasive wear test. The tests were carried out in accordance with under ASTM G99 standard. Microstructure images of the wear zone were taken with SEM-EDX. Dendrite and eutectic showed a dense structure in all coatings. The lowest hardness value in the coating layer was N1 (TiC) 1156 HV_{0.5}, while the highest hardness value was N6 (TiC-5% C) 1351 HV_{0.5}. As a result of the analysis, the lowest wear resistance was obtained from sample N1, while the highest wear resistance was obtained from sample N6. As a result of the analysis, the friction coefficient was 0.6 in the N1 sample and 0.2 in the N6 sample. The wear test analysis results determined that the microhardness and wear resistance increased while the weight loss decreased with the increasing C ratio.

1. Giriş

Son yıllarda farklı endüstri dallarında metal yüzeylerin performansını arttırmak amacıyla metal matris kompozitlere takviye malzemesi ekleme yöntemi çözüm yöntemi olarak denenmiştir (Zabihi & Soltani, 2018; Buytoz, 2020). Metal matrisli kompozit (MMK) kaplamalar yüksek sertlik, olağanüstü aşınma direnci (He ve ark., 2020), korozyon direnci ile birlikte iyi elastiklik modülleri ve düşük yoğunluklarına bağlı olarak büyük ilgi görmüştür (Tijo ve ark., 2018).

MMK'ler yüksek erime noktası, yüksek sertlikleri ve iyi aşınma dirençlerinden dolayı TiC, WC, TiB₂, SiC, NbC ve Cr₃C₂ gibi sert takviye fazlarının Fe, Co veya Ni gibi bir metal matris içinde dağıtıldığı bir kompozit türüdür (Emamian ve ark., 2011; Rachidi ve ark., 2019). Diğer kompozitlerle kıyaslandığında TiC yüksek sertliği, yüksek ısı iletkenliği, yüksek erime sıcaklığı, yüksek yorulma mukavemeti ve üstün aşınma dirençlerinin sonucu olarak iyi tribolojik özellikleri ile sağladığı avantajlardan dolayı yüzey özelliklerini geliştirmek için birçok araştırmacı tarafından kullanılmaktadır (Shahroozi ve ark., 2018; Janicki, 2018; Zhang ve ark., 2022).

Yüksek hızlı hava yakıtı (HVOF) ile TiC-Fe kompozit kaplama üzerine yaptıkları çalışmada TiC ilavesinin TiC-Fe sermet kaplamanın mikroyapısı, mekanik özellikleri ve aşınma davranışı üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Bu çalışmada TiC ilavesinin aşınma direnci ve mikrosertliğini önemli ölçüde arttırdığı görülmüştür (Xiao ve ark., 2021).

Plazma sprej yöntemi ile hazırlanan TiC takviyeli Ni/TiC kaplamanın mikroyapı ve tribolojik özelliklerini incelemişlerdir. TiC takviye oranının % 30 artırılması ile sürtünme katsayısı ve aşınma oranının en düşük değere ulaştığı görülmüştür (Cai ve ark., 2011a).

AISI 303 paslanmaz çelik yüzeyini TiC ile kaplamışlardır. Kaplanmış ve kaplanmamış paslanmaz çeliğin kuru kayma koşullarında aşınma direncini incelemiş ve kaplanmamış paslanmaz çeliğin zayıf aşınma direnci göstermesine karşın TiC kaplanmış alt tabakanın aşınma direncini önemli ölçüde arttırdığı tespit edilmiştir (Rasool & Stack, 2014).

Mekanik alaşımlama yöntemini kullanarak D2 yüzeyinde TiC biriktirilmesi sonrası optimize edilmiş parametrelerle üretilmiş kaplama için en yüksek sertlik ve aşınma direnci sağlandığını tespit etmişlerdir (Saba ve ark., 2016). Hem sert seramik faz (TiC) partikülleri hem de katı yağlama partikülleri (grafit) ile güçlendirilmiş kompozit malzemelerin iyi tribolojik özellikler sergilediği bilinmektedir (Cai ve ark., 2011b). Grafit gibi kendi kendini yağlayan takviye katmanlı yapının mükemmel yağlama özellikleri nedeniyle sürtünme önleyici özellikleri geliştirdiği de tespit edilen bir özelliktir (Rajkumar & Aravindan, 2011).

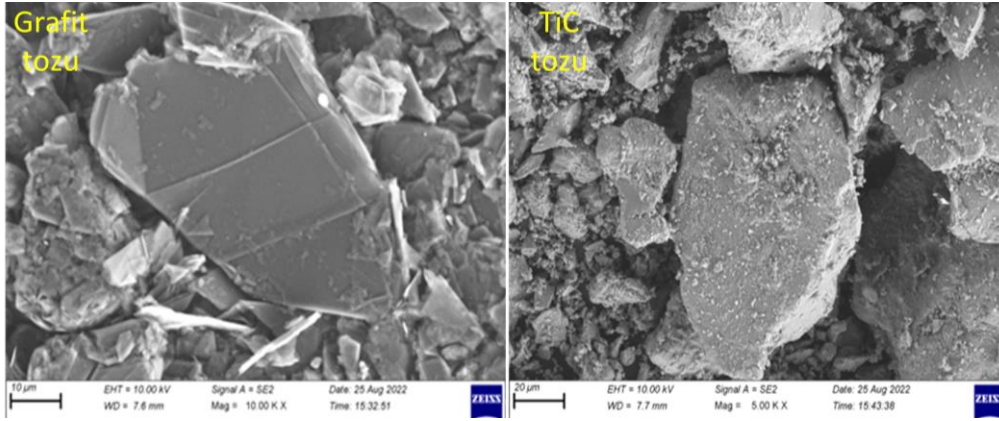
Demir esaslı TiC kaplamalar, plazma püskürtme, HVOF, SHS, TRD, Lazer, PTA, TIG yöntemleri kullanılarak uygulanmaktadır (Buytoz, 2006; Ozel ve ark., 2008; Kurt ve ark., 2014; Oh ve ark., 2015; Kılıç ve ark., 2019; Durmuş ve ark., 2020; Ma ve ark., 2020). Bu yöntemler içinde püskürtme yönteminde kaplama katmanında zayıf yapışma, yetersiz erime ve gözenek problemlerinin olduğu bilinmektedir. Ayrıca tüm bu tekniklerin aynı zamanda pahalı kurulum gerektirmesi ve sistemin hassas kontrolü gerektirmesi nedeniyle kullanımlarını sınırlı hale getirmektedir. Buna karşın TIG kaplama yöntemi ise, düşük maliyetli, atmosfer ortamında kullanım kolaylığı ve kaplama kalınlığındaki kimyasal bileşim ve özelliklerin kontrol edilmesi diğer işlemlere göre daha kolay olan bir kaplama yöntemidir (Lailatul & Maleque, 2017; Rao ve ark., 2018; Chen ve ark., 2019). TIG kaplama/alaşımlama yöntemi, metal altlıkların yüzeyinde çok yüksek erime sıcaklığına sahip seramikleri, altlık yüzeyine önceden yerleştirilmiş toz veya toz karışımlarının eritilmesiyle geliştirilen yüzey katmanı ile kaplamanın alternatif bir yoludur (Kılıç, 2021).

Yapılan literatür araştırmasında TiC ile ilgili birçok çalışma yer almasına rağmen TIG yöntemi kullanılarak TiC-C ile ilgili kaplama çalışmasına rastlanmamış olup bu amaca yönelik yapılan bu çalışmanın literatüre katkı sunacağı düşünülmektedir. Çalışmada TIG kaplama faz bileşenlerinin belirlenmesi için XRD analizi yapılmıştır. Kaplamaların mekanik özellikleri mikrosertlik ve aşınma ile test edilmiş olup, SEM-EDX ile karakterize edilmiştir. Kaplama tabakasından meydana gelen sert fazların aşınma ve mikrosertliğe etkisi incelenmiştir.

2. Materyal ve Yöntem

Kaplama işleminde alt tabaka olarak AISI1040 çeliği kullanılmıştır. AISI 1040 deney numuneleri 120x20x10 mm (Boy x Genişlik x Kalınlık) ebatlarında kesildikten sonra dikey freze tezgahı

kullanılarak yüzey temizleme işlemi sonrasında deney lamaları üzerine 8 mm genişliğinde ve 1,25 mm derinliğinde kanal açma işlemi uygulanmıştır. Kanal açma işlemi sonrası parça yüzeylerinde kir ve kalıntıların kalmaması için alkol ile temizlenmiştir. Kaplamada kullanılan 43 mikron boyutuna sahip TiC tozu BC danışmanlık firmasından, -325 mesh boyutuna sahip C tozu ise Alfa Aesar firmasından temin edilmiştir. Tozlara ait resimlere Şekil 1'de yer verilmiştir. AISI 1040 çeliğine ait kimyasal bileşim Çizelge 1'de, TiC tozlarına ait kimyasal içerik ise Çizelge 2'de gösterilmektedir.



Şekil 1. Kaplama işleminde kullanılan Grafit ve TiC tozlarına ait SEM resimleri.

Çizelge 1. AISI 1040 çeliğinin kimyasal bileşimi

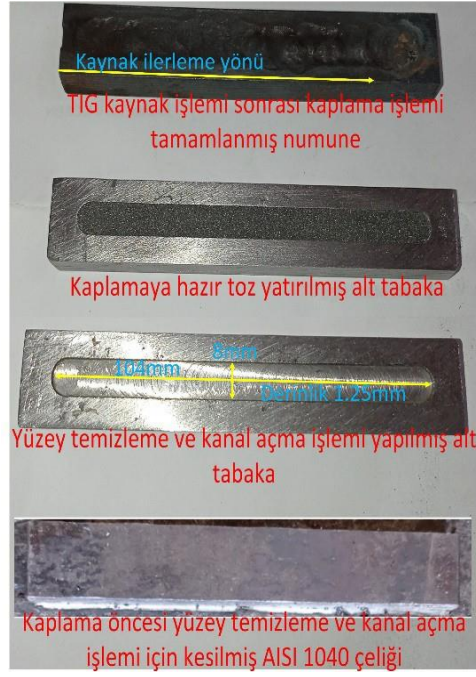
Alaşım	Alaşım elementleri (%)						
	C	Si	Mn	Pmax	Smax	Cr	Fe
AISI 1040	0.40-0.50	0.25-0.35	0.60-0.90	0.04	0.05	-	Kalan

Çizelge 2. Titanyum karbürün kimyasal özellikleri

%Ti	%C	%Al	%Si	%S
70-73	0,5 max	4 max	0,25 max	0,02 max

Hazırlanan tozlar alkol ile bulmaç haline getirildikten sonra alt tabaka üzerine açılan kanala yatırılmıştır. Kurutma işlemi için 40 °C sıcaklıkta 1 saat süre ile fırın içerisinde tutulmuştur. Bu işlemin yapılmasındaki temel amaç TIG kaynak işlemi esnasında argon gaz üflemesi sonucu tozların uçuşmasını engellemektir. Kaplama işlemi için Magmaweld Powered ID300TW AC/DC akımlarında çalışan kaynak makinesinden faydalanılmıştır. Elektrod olarak %2 toryumlu 2.4 mm çapında ergimeyen elektrod ve koruyucu gaz olarak 12 l/dk gaz akışında argon gazı kullanılmıştır. Kaplama işlem aşamalarına ait resime Şekil 2'de yer verilmiştir. Kaplamada kullanılan parametrelere Çizelge 3'te verilmiştir. Kullanılan toz bileşenleri % ağırlıkça olarak belirlenmiştir.

Üretilen kaplama numuneleri, metalografik incelemeler için hassas kesme makinesi ile enine kesit olacak şekilde kesilmiştir. Numuneler kaba parlatma işlemi için 120-1200 mesh arası SiC karbür zımparalar ile aşama aşama parlatılmıştır. Kaba parlatma işlemi sonrası numuneler 1 ve 3 mikronluk elmas pasta sülsiyonu kullanılarak çuhada parlatılmıştır. Parlatma işlemi tamamlanan numuneler %3 Nital çözelti kullanılarak 5 sn süre ile dağlanmışır. Mikrosertlik incelemeleri için Future Tech marka ve FM-700 model cihaz kullanılmıştır. Sertlik testi, 50 gf yük altında, 10 sn. süre ile gerçekleştirilmiştir. Aşınma deneyi için 6 mm çapında çelik bilye kullanılmıştır. Deneyler TURKYUS PODWT aşınma cihazında 300 dev/dak hızında ve 6 mm iz çapında, sırasıyla 200 ve 400 m mesafelerde 5N yük altında ASTM G99 standardına uygun olacak şekilde yapılmıştır. Aşınma cihazına ait görsele Şekil 2'de yer verilmiştir.



Şekil 2. Kaplama işlem aşamaları.

Çizelge 3. İlk kaplamanın yapıldığı TIG kaynak parametreleri

Numune Sayısı	Toz oranları	Uygulanan Akım (A)	İlerleme Hızı (mm/s)	Isı girdisi (J/m)
N1	TiC - saf	100	0.45	9.06
N2	TiC -%1 ağı. C		0.39	11.44
N3	TiC -%2 ağı. C		0.39	10.95
N4	TiC -%3 ağı. C		0.47	8.99
N5	TiC -%4 ağı. C		0.43	10.27
N6	TiC -%5 ağı. C		0.42	10.17



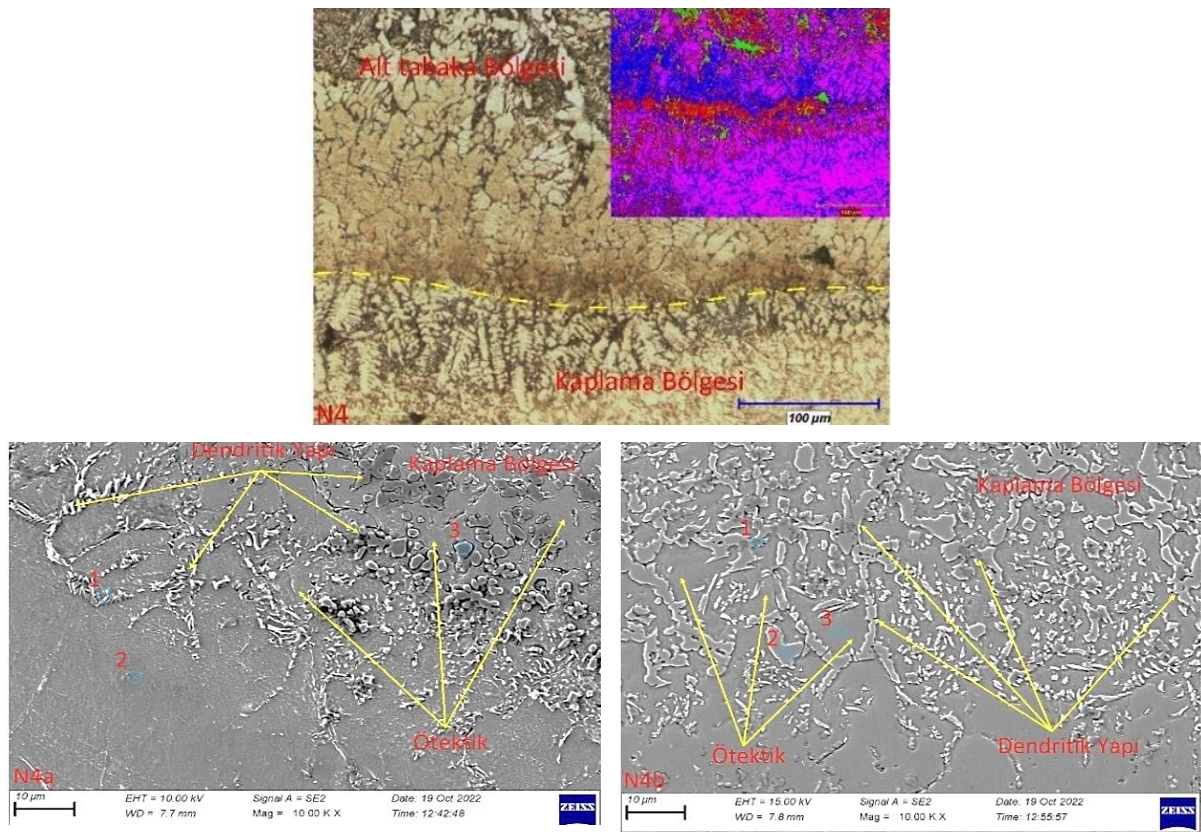
Şekil 3. Aşınma cihazı.

Kaplama tabakasında oluşan çeşitli bileşiklerin değerlendirilmesi için, farklı parametrelerde üretilen tüm kaplama numuneleri için X ışını kırınımı (XRD) tekniği kullanılmıştır. XRD ölçümleri, 20–90° tarama aralığında, 0.02° adım boyutunda ve dakikada 10°'lik bir tarama hızında alınarak cobalt hedef ($\lambda = 1.79026 \text{ \AA}$) kullanılarak Rigaku RadB-DMax II difraktometre yardımı ile gerçekleştirilmiştir.

3. Bulgular ve Tartışma

3.1. Mikroyapı incelemeleri

TIG ergitme yöntemiyle üretilen N4 kaplamaya ait yan kesit yüzey mikroyapısı Şekil 4'te verilmektedir. Mikroyapı oluşumunda altlık, geçiş bölgesi ve kaplama tabakası olmak üzere 3 farklı bölge meydana gelmiştir (Şekil 4). Kaplama tabakası sütun şekilli dendritik ve ötektik yapılardan oluşmuştur. N4 SEM-EDS analiz sonucunda kaplama bölgesinin özellikle partikül yapıların Ti ve C yoğunlukta olduğu görülmektedir (Şekil 4 a ve b). Dendritik ve ötektik yapılarda ise Ti ve C elementi ile birlikte Fe elementinin varlığı tespit edilmiştir. Kaplamanın hızlı katılma süreci sırasında, kaplama katmanları tekrar eridiğinde ve TiC partiküllerinin etkisinden dolayı karmaşık büyüme yönlerine sahip dendritler oluşur (Yue ve ark., 2022). Bu durumun TIG kaynak işlemi esnasında ark ısısının başlamasıyla birlikte alt tabakanın kaplama tozlarıyla birlikte ergimesi ve hızlı bir şekilde katılması sonucunda, Fe elementinin kaplama tabaka yüzeyinde hapsolmesi sonucunda yer aldığı düşünülmektedir.

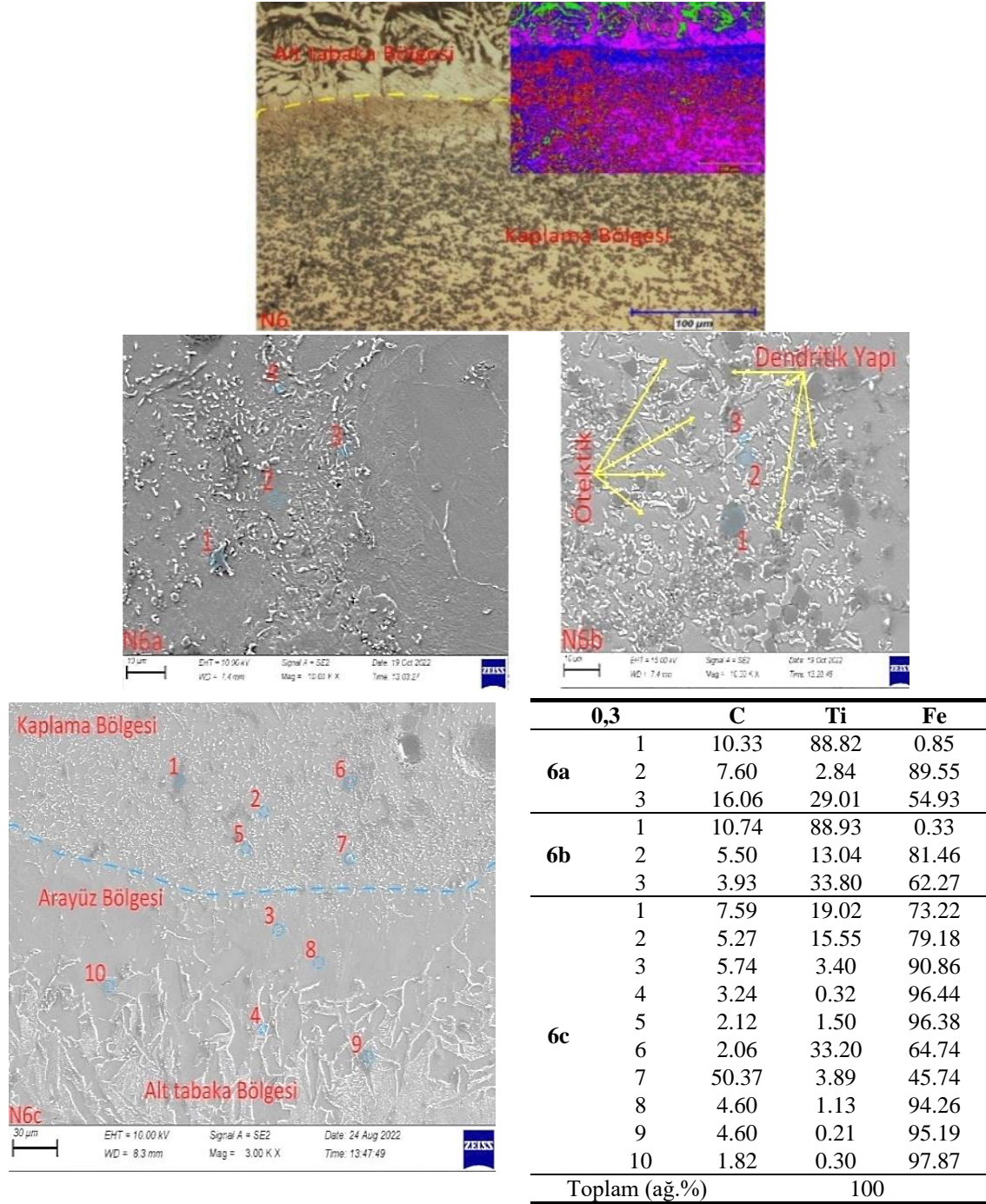


	Spektrum	C	Ti	F
4a	1	14,55	7,39	78,07
	2	19,05	3,93	77,03
	3	6,35	93,07	0,58
4b	1	9,33	83,94	6,73
	2	3,18	51,01	45,81
	3	5,31	15,38	79,31
Toplam (ağ. %)			100	

Şekil 4. N4 nolu numuneye ait optik mikroyapı, SEM-EDS görüntüleri ve EDS sonuç tablosu.

TIG ergitme yöntemiyle üretilen kaplamaların N6 numunelerinin yan kesit yüzey optik mikroyapıları ile SEM, EDS sonuçlarına ait tabloya Şekil 5'te yer verilmiştir. Kaplama bölgesi altlık, geçiş bölgesi ve kaplama tabakası olmak üzere 3 farklı bölge meydana gelmiştir (Şekil 5). Bu durum kaplama ve alt tabaka arasında iyi bir metalurjik bağ oluştuğunu göstermektedir. Mikroyapı daha çok

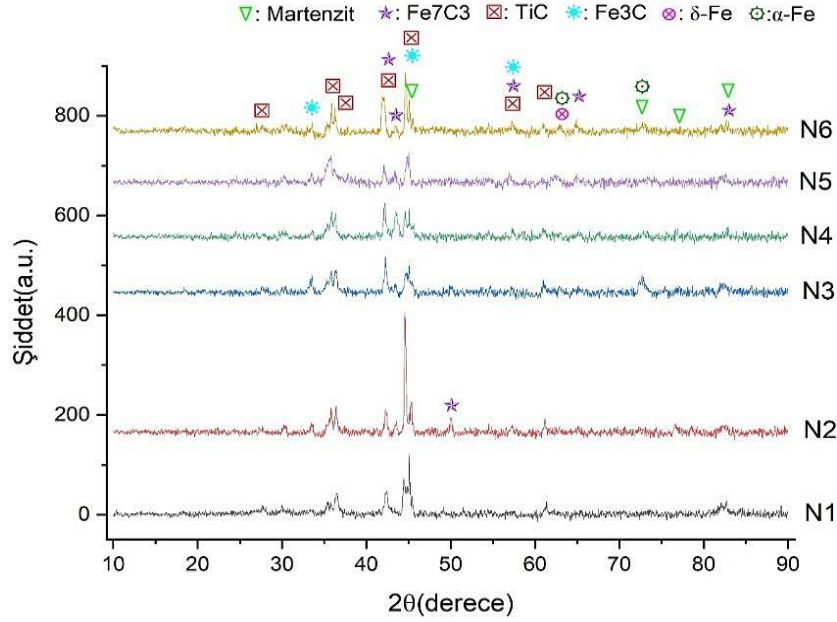
küçük yaprak ve çiçek şekilli dendritikler ve ötektik yapıdan oluşmuştur. Metal yada alaşım elementlerinde birincil ve ikincil kollar şeklinde meydana gelen dendritler, katılmış metallerde ve diğer malzemelerde en sık gözlenen mikroyapıdır. Hızlı soğutma ince dendritler üretirken, yavaş soğutma büyük ve kaba dendritlerin oluşmasını sağlayarak malzemelerin özelliğini etkilerler (Kılıç ve ark., 2021). N6'ya ait SEM-EDS analiz sonucunda kaplama bölgesinin özellikle partikül yapıların Ti ve C yoğunlukta olduğu görülmektedir. Toz karışımı TIG ark ısıısıyla temas ettiğinde hızla ısınacaktır. Saf Fe, Ti ve C'nin (veya grafitin) erime noktaları sırasıyla 1538, 1668 ve 3400 °C'dir. Saf tozların nispi erime sıcaklıkları göz önüne alındığında, Ti ve grafit tozlarını yayan ve çevreleyen bir sıvı faz oluşturarak önce Fe'nin eridiğini varsaymak mantıklıdır (Emamian ve ark., 2011). Bu partiküllerin sıvı içerisinde çözünmeden hapsolan TiC parçacıklarından oluştuğu düşünülmektedir. Kaplama bölgesinde gözenek ve çatlak oluşmadığı gözlenmiştir.



Şekil 5. N6 nolu numuneye ait optik mikroyapı, üçlü faz diyagramı, SEM-EDS görüntüleri ve EDS sonuç tablosu.

3.2. XRD sonuçları

Kaplama bileşen fazlarının tespiti amacıyla elde edilen numunelere XRD analizi yapılmıştır. Şekil 6'da AISI 1040 çelik üzerine TIG yöntemi ile üretilmiş olan farklı oranlarındaki C ilave edilmiş TiC-C kaplama tabakasına ait XRD analiz sonuç grafiği gösterilmektedir.



Şekil 6. Numunelere ait XRD grafiği.

Şekil 6 grafiği incelendiğinde tüm numunelerin yüzeyinde oluşan baskın fazın TiC fazı ile birlikte Fe_7C_3 , Fe_3C ve martenzit fazlarının olduğu, düşük pik değerlerinde $\alpha - Fe$ ve $\delta - Fe$ fazlarının da oluştuğu tespit edilmiştir. EDS sonuçlarına bağlı olarak çizilen üçlü faz diyagramlarında baskın fazların Fe ve TiC esaslı fazlar olduğu gözlenmiştir (Şekil 4 ve 5). Fe bazlı kaplamada aynı anda birden fazla karbür üretildiğinde, karbon için en yüksek afiniteye sahip karbür elementi tercihen oluşturulur. TiC, metal (Fe, Cr) karbürlerden daha yüksek bir erime noktasına sahip olduğundan, Gibbs serbest enerjisi daha düşüktür (130.348 J/mol, 3400 K) ve Ti ile C elementleri arasındaki afinite yüksektir; bu nedenle, TiC taneleri tercihen metal sıvıdan çöktürülür (Yue ve ark., 2022). Numuneye C eklendiğinde XRD modellerinde önemli bir farklılık gözlenmemekte ve TiC içerik yüzdesindeki farklılıktan dolayı yalnızca tepe yoğunluklarında bir fark oluşmaktadır (Zhang ve ark., 2022). Nitekim benzer fazlar farklı araştırmacılar tarafından da tespit edilmiştir (Khalili ve ark., 2019; Moghaddam ve ark., 2019; Buytoz, 2020).

3.3. Mikrosertlik analiz sonuçları

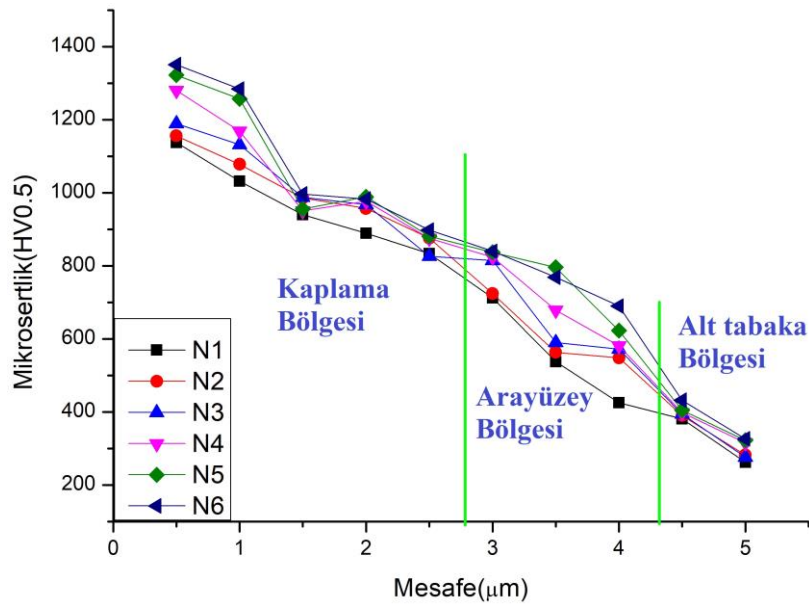
Metal malzemelerde yüzeyi daha dirençli hale getirmek için yapılan yüzey kaplamaların mikroyapı özelliklerinin kaplamaların mekanik özellikleri (mikrosertlik ve aşınma dayanımı) üzerinde önemli bir etkisi vardır. C oranındaki artışa bağlı olarak kaplamaların mikrosertlik ölçümleri yapılmıştır. Takviye fazının içeriğinin artmasına bağlı olarak kaplamanın mikrosertliğini de iyileştirdiği bilinmektedir (Zhao ve ark., 2020b). Kaplama enine kesit numunesinde kaplama merkezinden başlayarak alt tabakaya doğru olmak üzere; kaplama bölgesi, arayüzey bölgesi ve ana malzeme olmak üzere 3 farklı bölgeden sertlik değerleri ölçülmüştür. Çizelge 4'te mikrosertlik ölçüm sonuçları yer alırken Şekil 7'de ise kaplama merkezinden uzaklığa bağlı olarak sertlik değişimine ait çizgi grafiği yer almaktadır.

Mikrosertlik değerinin kaplama üzerindeki dağılımı öncelikle kaplama profiline ve güçlendirilmiş sert parçacıkların kaplama üzerindeki şekline, konsantrasyonuna ve dağılımına bağlıdır (Tijo & Masanta, 2018). TiC-C matristeki sert TiC parçacıklarının varlığı, metal matrisli kompozitin

daha yüksek sertliğine yol açarken, daha az TiC fraksiyonlu katmanlar ise daha düşük sertlik değeri sergilemiştir (Rezapoore ve ark., 2018).

Çizelge 4. Ölçülen mikrosertlik değerleri

N1	N2	N3	N4	N5	N6
1138	1156	1189	1280	1322	1351
1032	1078	1132	1169	1257	1284
940	986	988	951	956	997
889	957	968	977	989	983
834	876	826	875	881	898
712	724	815	824	837	840
537	563	590	678	796	769
425	548	572	581	623	690
381	390	394	398	405	432
262	282	276	315	322	326



Şekil 7. Kaplama tabakaları için elde edilen mikrosertlik değerleri.

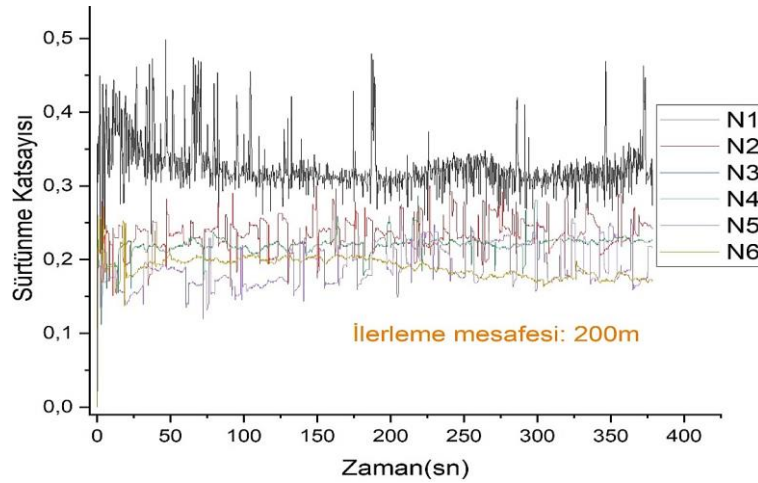
Şekil 7’de kaplama merkezinden uzaklığa bağlı olarak alınan sertlik değeri ölçümlerinin grafiğinde kaplama tabakasının mikro yapısındaki ve kimyasal bileşimdeki farklılıklar nedeniyle, kaplama tabakasında alt tabakaya doğru keskin bir azalış meydana gelmiştir (Shahrooz ve ark., 2018). Bu farkın temel sebebi olarak yazarların ifade ettiği gibi katılma ile birlikte kaplama tabakasında oluşan ve Şekil 6’da yer verilmiş olan XRD grafiğinden de görüldüğü üzere yapıda oluşmuş olan Martenzit, Fe_7C_3 , TiC ve Fe_3C gibi sert fazların büyük etkisinin olduğu düşünülmektedir. Buna göre en yüksek sertlik ölçümü 1351 $HV_{0.5}$ ile N6 nolu numunede tespit edilmiştir. En düşük değer ise 262 $HV_{0.5}$ ölçüm değeriyle N1 numunesinin alt tabakasından elde edilmiştir. Diğer değerlere bakıldığında C takviyesiz N1 nolu numunede alt tabakada en yüksek 381 $HV_{0.5}$ değer elde edilirken kaplama tabakasında ise yaklaşık 4 katı bir değer ile 1138 $HV_{0.5}$ ile sonuçlandığı görülmüştür. Bununla birlikte C takviyeli N2, N3, N4, N5, N6 numunelerin sertlik değerleri sırasıyla alt tabaka olarak en yüksek 390 $HV_{0.5}$, 394 $HV_{0.5}$, 398 $HV_{0.5}$, 405 $HV_{0.5}$, 432 $HV_{0.5}$ elde edilirken kaplama tabakasında ise sırasıyla 1156 $HV_{0.5}$, 1189 $HV_{0.5}$, 1280 $HV_{0.5}$, 1322 $HV_{0.5}$, 1351 $HV_{0.5}$ olarak ölçülmüştür. Ti-Grafit ilavesi ile kompozit kaplamaların sertliği daha yüksek dalgalanmalarla artmaktadır. Artan sertliğin esas olarak TiC sert fazının oluşumundan kaynaklandığı daha önceki çalışmalarda belirtilmiştir (He ve ark., 2020). Daha önce yapılmış olan kaplama çalışmalarında da mikrosertlik değerinin artan TiC oranına bağlı olarak arttığı ifade edilmiştir (Tijo & Masanta, 2018; Zhao ve ark., 2020a). TIG yöntemiyle 1045 üzerine Stellite 6 ve Stellite 6/TiC kaplamamışlardır. İşlem sonunda TiC miktarı arttıkça, kaplamanın sertliğinin

arttığı ve Stellite 6'daki 400 Hv'den ortalama sertlik değerinin, Stellite 6 +% 40 TiC'deki ortalama 700 Hv'ye yükseldiği ifade etmişlerdir (Shahroozi ve ark., 2018). Ara bölgeden alınan sertlik ölçüm değerleri incelendiğinde sonuçların kaplama tabakasına göre düşük, alt tabakaya göre ise yüksek olduğu tespit edilmiştir. N1, N2, N3, N4, N5 ve N6 numunelerinin arayüz bölgesinde elde edilen en yüksek sertlik ölçüm değerleri sırasıyla; 537 HV0.5, 563 HV0.5, 590 HV0.5, 678 HV0.5, 796 HV0.5 ve 769 HV0.5 olarak ölçülmüştür. Fe elementinin alt tabakadan difüzyonu nedeniyle arayüz bölgesindeki sertliğin kaplama tabakasına göre yarı yarıya düşüşüne yol açmıştır (Buytoz ve ark., 2022). Alt tabaka, N1, N2, N3, N4, N5 ve N6 numunelerine ait ortalama sertlik değerleri sırasıyla; 715 HV0.5, 756 HV0.5, 775 HV0.5, 804,8 HV0.5, 838,8 HV0.5, 857 HV0.5 olarak ölçülmüş ve sonuçlara Şekil 4'te grafikteki yer verilmiştir.

3.4. Yüzey aşınma

Malzemelerin aşınmasında uygulanan yük, kayma mesafesi, kayma zamanı, yağlama durumu, malzeme çifti ve kaplama yöntemleri gibi yapılan diğer işlemler oldukça önemli parametrelerdir. Bu parametrelerin bazıları malzeme üretilirken ve bazıları üretilen malzemeye kaplama gibi yeni işlem uygulamasında önem kazanmaktadır. Aşınma deneyi esnasında ise bu parametreler bir bütün olarak ele alındığında, sürtünme esnasında açığa çıkan ısı, tribo yüzeyin oluşup oluşmadığı, sürtünme katsayısının değeri, kütle kaybı veya şekil değişiminin önemli olduğu görülmektedir (Rachidi ve ark., 2019).

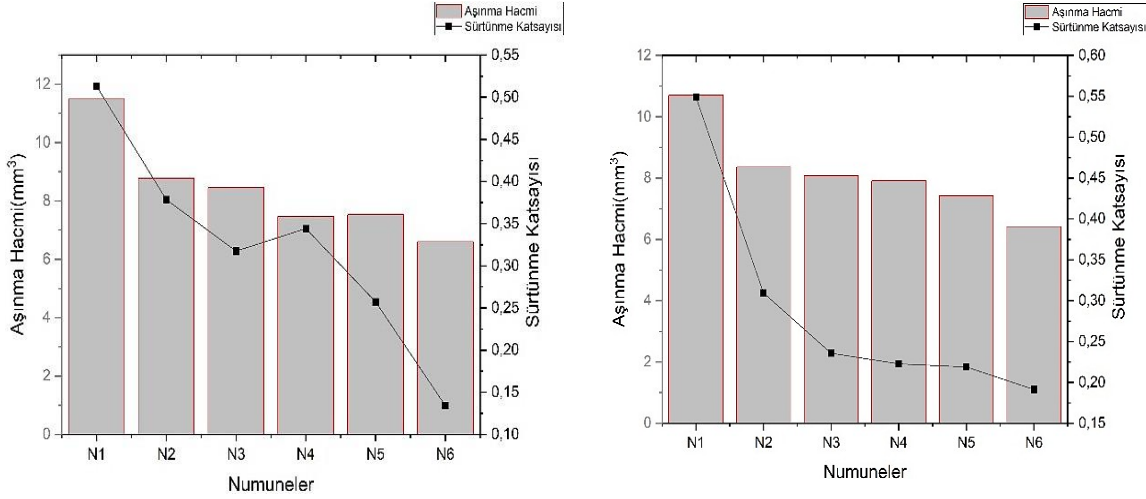
TiC-C kaplamanın aşınma özellikleri pin on disk abrasiv aşınma testi uygulanarak belirlenmiştir (Şekil 8).



Şekil 8. Aşınma sonrası zaman bağımlı sürtünme katsayısı grafiği.

Şekil 8'de görüldüğü üzere kayma süresine bağlı olarak sürtünme katsayısında dalgalanmaların olduğu görülmektedir. Düşük uygulama yüklerinde bu dalgalanmalar daha az olurken, artan yükler dalgalanmaları artırmaktadır. Oluşan bu dalgalanmaların, aşındırıcının kaplama yüzeyindeki sert karbür ile teması ve artan C oranına bağlı olduğu düşünülmüştür (Çelik & Seçilmiş, 2017). Bununla birlikte dalgalanmaların, çelik bilye yüzeyine yapışmış sert karbür fazlarına temasından da kaynaklandığı ihtimali de mevcuttur.

Aşınma hacim miktarları ile ilgili yapılan ölçümlerde Şekil 9'daki grafikler elde edilmiştir. Şekil 9 incelendiğinde, aşınma parametrelerine bağlı olarak aşınma hacim miktarının sürtünme katsayısının aşınma ile doğru orantılı olduğu görülecektir. Bunun nedeni olarak malzeme sertliğinin plastik deformasyonu engellemesinden kaynaklı olduğu düşünülmektedir. Ancak tüm uygulama yükleri birlikte incelendiğinde takviye oranına bağlı olarak sürtünme katsayısı grafiğinin stabil olmadığı da ayrıca görülecektir.



Şekil 9. Sürtünme katsayısına bağlı olarak meydana gelen aşınma hacmi oranı grafiği (200m-400m mesafede).

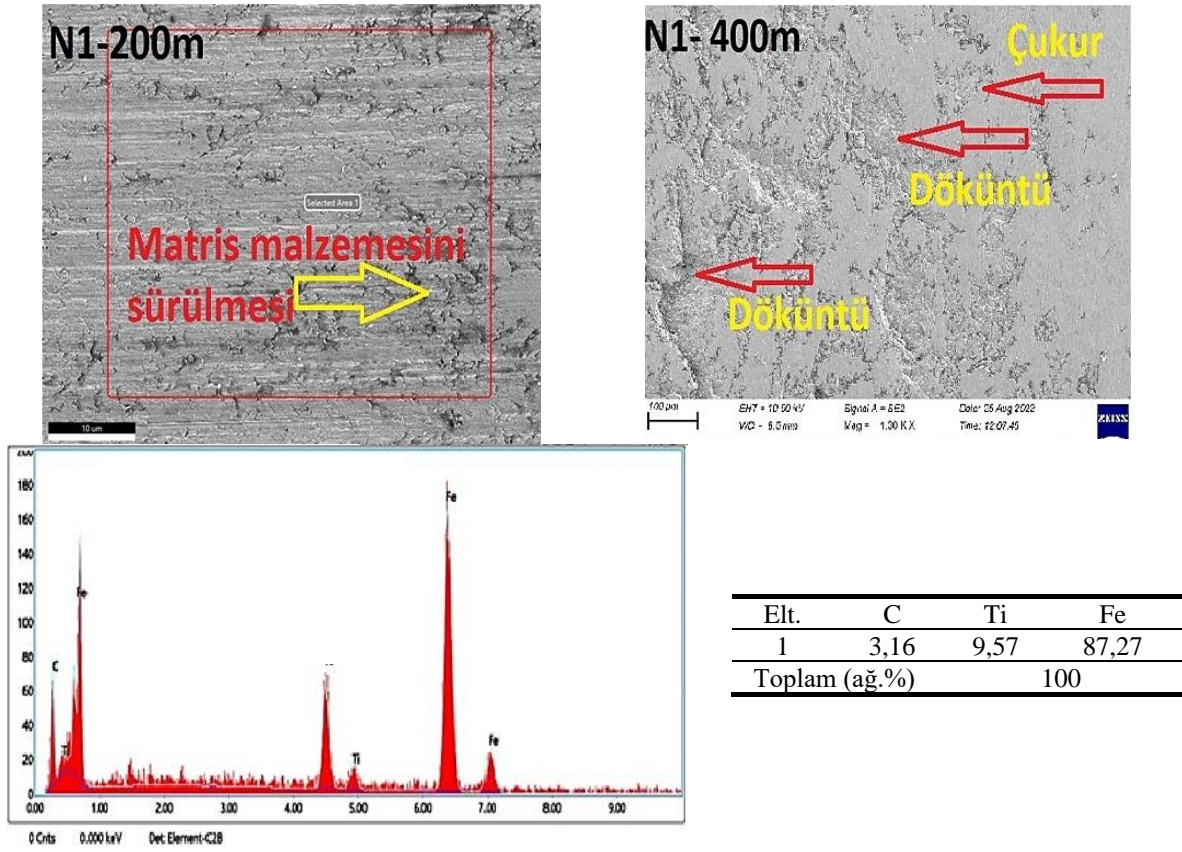
Tüm normal yükler için hibrit kompozitlerin sergilediği aşınma oranı daha düşük değerlerde elde edilmektedir. TiC ve grafitin hacim oranındaki artışla aşınma oranında gözlenen azalma, TiC ve grafit takviyelerin birleşik etkisinin sunduğu aşınma direncinden kaynaklanmaktadır. Hacimce %5 grafit hibrit kompozitler, tüm normal yük aralıkları için hacimce %10 grafit hibrit kompozitle karşılaştırıldığında daha yüksek aşınma oranı sergilemiştir. TiC ve grafit hacim fraksiyonundaki artışla aşınma oranında daha yüksek azalma gerçekleşmektedir (Cai ve ark., 2011b). Bu durumun, aşınmış numunelerin SEM morfolojilerine ait görüntüler incelendiğinde, aşınma bölgesinde meydana gelen oluk, pullanma, kopma ve döküntü gibi etkenlerden kaynaklandığı düşünülmektedir.

Aşındırıcı parça ile kayma yüzeyi arasında oluşan tribo yüzey, sürtünme katsayısını düşürmektedir. Diğer bir değişle yük arttığında, pim ile karşı yüzey arasındaki nominal temas alanı artmakta, dolayısıyla temas sıcaklığındaki artış yüzeydeki yumuşamaya yol açmakta ve böylece temas yüzeyleri arasında daha fazla kayma hareketi meydana gelmektedir. Bu sonuç sürtünme katsayısında azalmayı da beraberinde getirmektedir (Demir ve ark., 2022a). Aşınma direnci ile mikrosertlik arasında doğru orantı olduğu görülmektedir. Elde edilen veriler ışığında değerlendirildiğinde mikrosertliğin artmasıyla birlikte aşınma direncinin arttığı Şekil 8'de verilmiş olan aşınma hacim kayıplardan tespit edilmiştir.

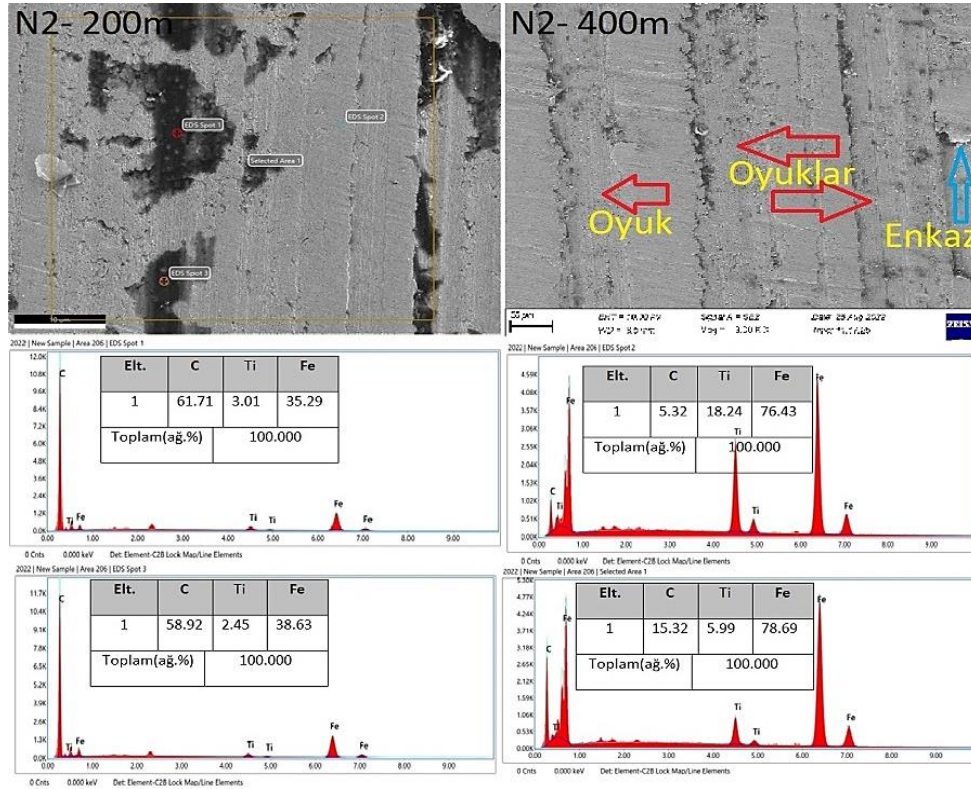
Ancak aşınma direnci ile mikrosertlik arasında doğru orantı olsa da, sürtünme katsayısı ile ters orantıya sahiptir. Sürtünme katsayısı düşük aynı zamanda da sertliği yüksek olan kaplamaların aşınma direnci de yüksek olmaktadır. Bu sonuçla aşınma testinin sürtünme katsayısı ve mikrosertlik değerlerinin aşınma direncinin belirlenmesinde önemli etkenler olduğu düşünülmektedir. Kaplama tabakasının aşınma özellikleri, TiC bileşeninin yüzdesi ve morfolojisinin yanı sıra kaplama tabakasının mikro yapısına ve mikro yapıya bağlı olarak gelişen mikro sertlik değerine de bağlıdır (Buytoz, 2020).

Şekil 10'da N1(TiC) numunesine ait yüzey aşınmasına ait morfoloji görülmektedir. Şekilde 200 m ilerleme mesafesinde, matris malzemenin süpürülmüş gibi bir görüntüye büründüğü, 400 m ilerleme mesafesinde ise döküntü ve çukurların oluştuğu görülmektedir. N1 numunesine ait EDX sonuçları sırasıyla %3.16 C, %9.57 Ti ve geri kalan demir şeklinde tespit edilmiştir.

N2(TiC-C) numunesine ait yüzey morfolojisi Şekil 11'de görülmektedir.



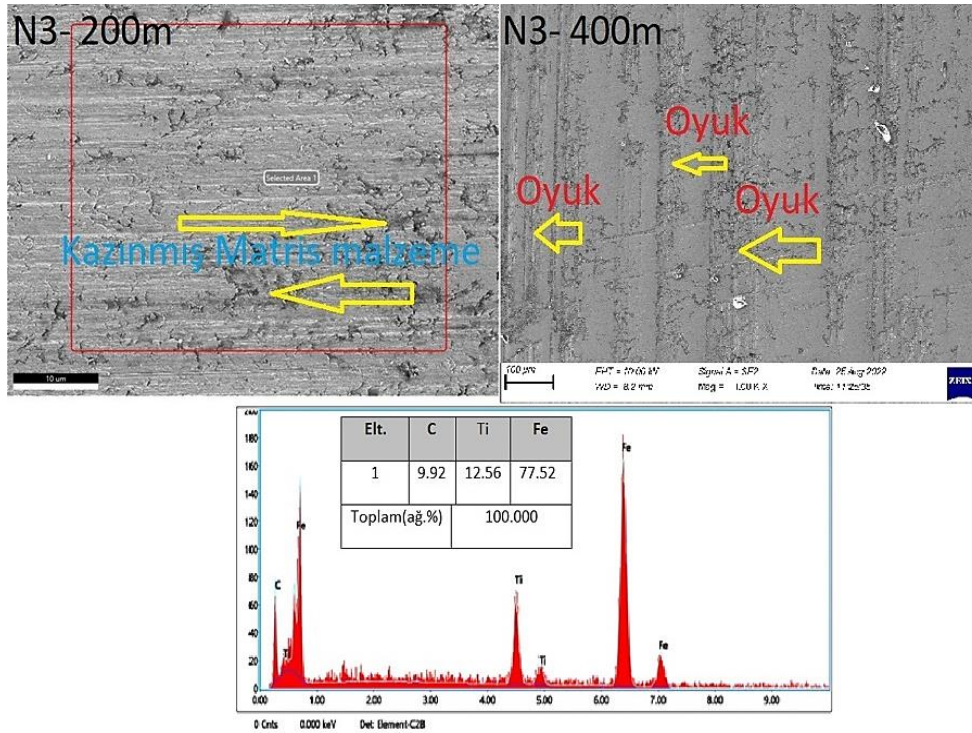
Şekil 10. N1 Aşınma analizi sonrası kaplama yüzey morfolojisinin SEM - EDS sonuçları.



Şekil 11. N2 Aşınma analizi sonrası kaplama yüzey morfolojisinin SEM-EDS sonuçları.

Şekil 11 incelendiğinde, N2 numunesinden meydana gelen aşınma mekanizması N1 göre daha az olmakla birlikte oyuk ve enkazların oluştuğu belirlenmiştir. Düşük oranda ilave edilen güçlendiricinin yüzey morfolojisine çok fazla etkisi olmamakla birlikte COF ve ağırlık kaybı (Şekil 8 ve 9) oranlarına etki etmiştir. N1 numunesine ait EDX sonuçları sırasıyla karşılaştırıldığında özellikle karbon ve Ti oranlarında artış olduğu gözlenmiştir. C oranının diğer numunelere kıyasla yüksek çıkmasının temel nedeni olarak alt tabakadan element transferi veya çözünmemiş C tozlarının varlığından kaynaklandığı düşünülmektedir. Bu artış ile birlikte N1 numunesine göre daha dirençli olmasına katkı sunduğu düşünülmektedir. Karbürlerin yüksek abrasif aşınma performansının aşınma direncini önemli ölçüde arttırdığı, koruyucu triboksit tabakaların etkisinin ise sürtünme katsayısını azalttığı bilinmektedir (Kılıçay & Ulutan, 2017).

N3 numunesi yüzey SEM resiminden görüldüğü üzere Şekil 12’de TiC oranının artması yüzey morfolojisinin N1 ve N2 numunesine göre daha düzgün bir yüzey oluşmasını sağlamıştır.



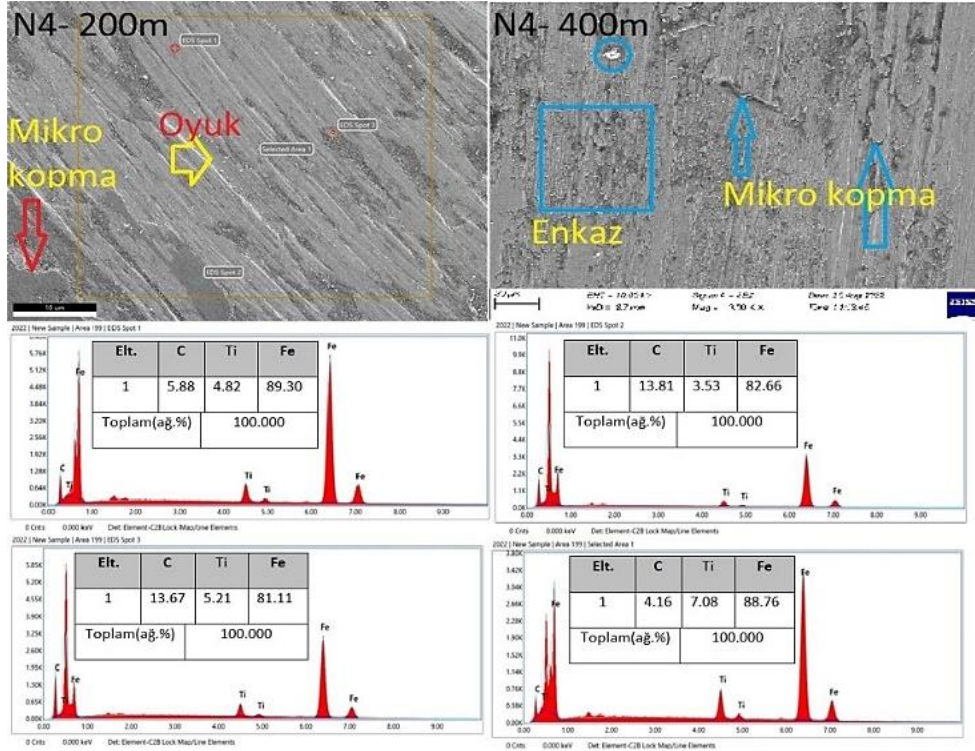
Şekil 12. N3 Aşınma analizi sonrası kaplama yüzey morfolojisinin SEM-EDS sonuçları.

Ayrıca Şekil 12’deki görüntülerde özellikle 400 m ilerleme mesafesinde olukların dar olduğu ve derin olmadığı açıkça görülmektedir. Kayma mesafesinin artması deformasyon bölgesinin daha büyük olmasına neden olacaktır. Ancak aşınma oranı, aşınma hacminin kayma mesafesine oranı olarak formüle edildiğinden, artan kayma mesafesi ile aşınma oranı azalmıştır (Demir ve ark., 2022b). N3 numunesine ait EDX sonuçları sırasıyla %9.96 C, % 12.56 Ti ve geri kalan demir şeklinde tespit edilmiştir.

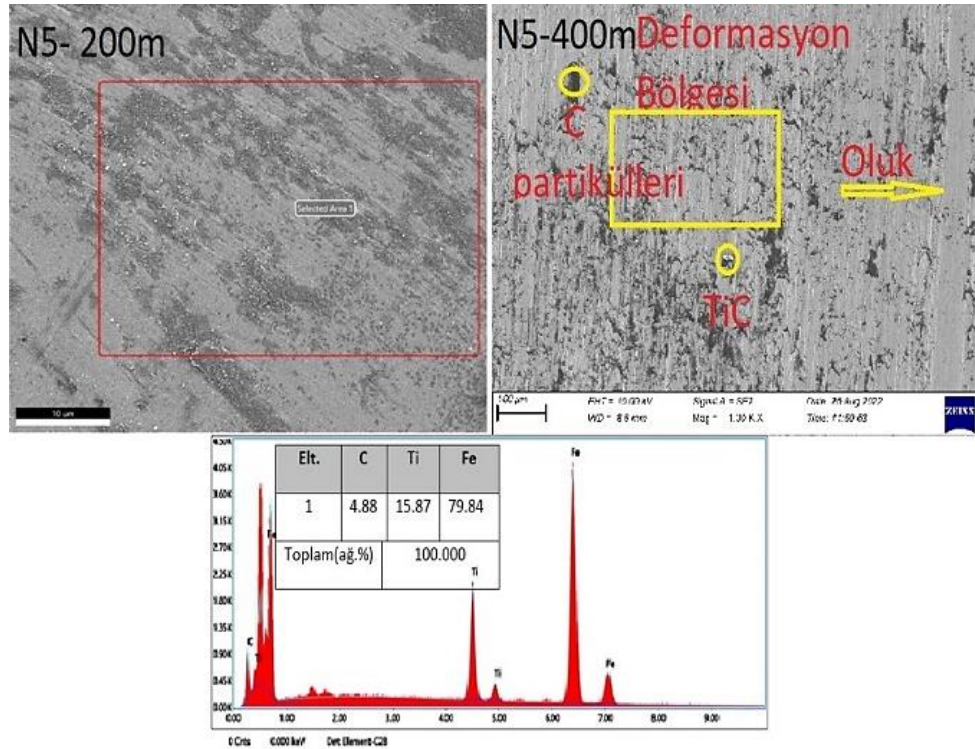
N4 numunesi yüzey SEM resiminden görüldüğü üzere Şekil 13’te TiC oranının artması yüzey morfolojisinin diğer göre daha düzgün bir yüzey oluşmasını sağlamıştır. Ayrıca görüntülerde oyukların dar olduğu ve derin olmadığı, mikro kopmaların meydana geldiği açıkça görülmektedir. N3 numunesine ait EDS sonuçlarında C, Ti ve Fe elementlerinin varlığı sözkonusudur.

N5 numunesi yüzey SEM resiminden görüldüğü üzere Şekil 14’te TiC oranının artması yüzey morfolojisinin diğerlerine göre daha düzgün bir yüzey oluşmasını sağlamıştır. Matristeki donatı oranı arttıkça iz genişliğinin daraldığı, aşınma bölgesindeki boşluk ve çatlakların azaldığı, matristen kopan tanelerin hacminin azaldığı gözlemlenmiştir. B₄C partiküllerinin aşındırıcı karşı yüzey ile teması sonucunda matris malzemesi ile karşı yüzey arasında bariyer görevi görerek aşınma direncini arttırdığı söylenebilir (He ve ark., 2020). N5 numunesine ait EDS sonuçları sırasıyla %4.88 C, %15.87 Ti (Şekil 14) ve geri kalan kısmın demir olduğu şeklinde tespit edilmiştir. TiC-C içeriğinin artmasıyla çiziklerin

derinliğinin azalması matristeki daha büyük miktarlardaki sert fazlardan kaynaklandığı ve ayrıca düzenli dağılımlarından dolayı sert fazların çıkarılmasını engellediği, böylece bileşenin aşınma direncini arttırdığı görülmektedir. Ti-grafit eklendikten sonra aşınma hacminin azalması, esas olarak kaplama aşınma direncini artıran TiC sert fazının oluşumundan kaynaklanmaktadır (Akkaş & Islak, 2019).

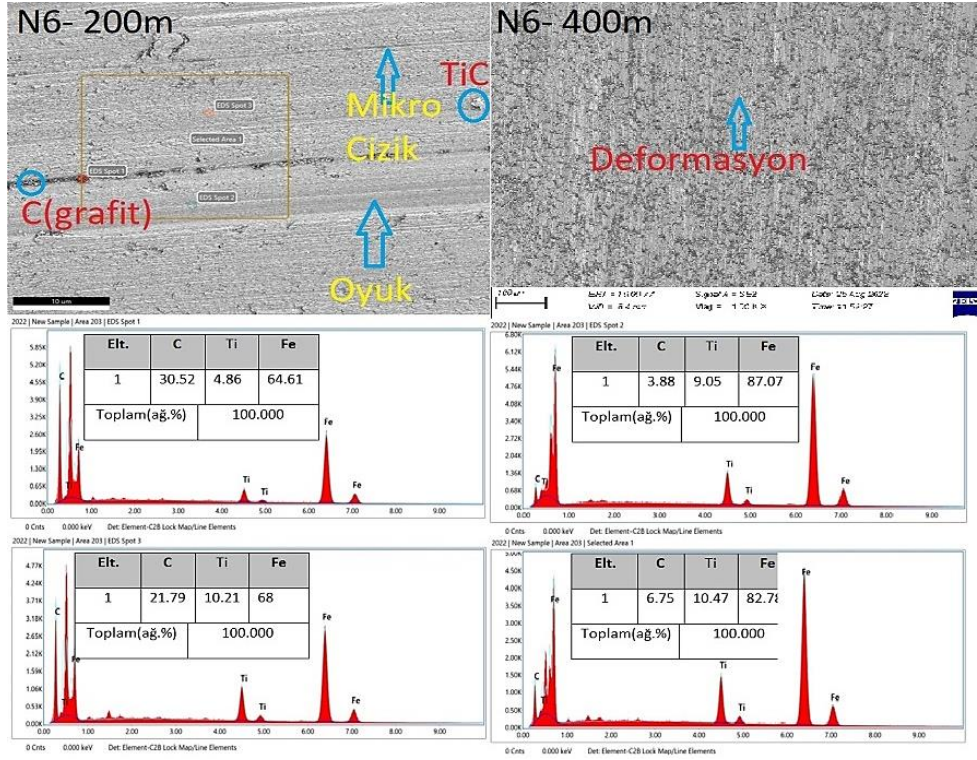


Şekil 13. N4 Aşınma analizi sonrası kaplama yüzey morfolojisinin SEM-EDS sonucu.



Şekil 14. N5 Aşınma analizi sonrası kaplama yüzey morfolojisinin SEM-EDS sonuçları.

N6 numunesinin yüzey SEM görüntüsünden görüldüğü gibi (Şekil 15), artan TiC oranı bağlı olarak diğer numunelerine kıyasla yüzey morfolojisi için daha pürüzsüz bir yüzey oluşmuştur (Şekil 15).



Şekil 15. N6 Aşınma analizi sonrası kaplama yüzey morfolojisinin SEM-EDS sonuçları.

Grafitin hacim oranı arttıkça sürtünme katsayısı azalmaktadır (Rajkumar & Aravindan, 2011). Sürtünme katsayısında gözlenen azalma, kayma sırasında pim yüzeyinden grafit parçacıklarının bulaşmasından kaynaklanmaktadır. %5 TiC ve %5 grafit kompozit için, 12 N'de sürtünme katsayısının 0,35 olduğunu tespit etmişlerdir (Cai ve ark., 2011b). Ayrıca olukların dar ve derin olmadığı, döküntülerin ve malzeme transferinin fazla olmadığı görsellerde net bir şekilde görülmektedir (Şekil 15). Ayrıca artan TiC içeriği ile çizik derinliğinin azaldığı görülmektedir. Ni matrisine ilave edilen bor ve TiC aşınma direncini arttırdığı belirtilmiştir (Akkaş & Islak, 2019). Bunun, matriste daha büyük miktarlarda sert fazların varlığından kaynaklandığı düşünülmektedir. Elde edilen sonuçlara bağlı olarak artan C oranı ile mikrosertliğin ve aşınma direncinin arttığı, ağırlık kaybının ise azaldığı belirlenmiştir. Dış kuvvetlere maruz kaldığında matris elemanı, güçlendirme aşaması için daha iyi bir destek çerçevesi sağlayabilir ve kaplamanın deformasyona karşı direncini iyileştirebilir. Aynı zamanda, takviye fazının içeriğinin artması, kaplamanın mikrosertliğini de iyileştirir (Zhao ve ark., 2020a). Bu sonuçlar ışığında artan C oranının alt tabaka yüzeyinin sertliği ve aşınma direncinin gelişmesinde önemli rol oynadığı söylenebilir.

4. Sonuç

Gerçekleştirilen bu tez çalışmasında, TIG kaynak yöntemi ile AISI 1040 yüzeyi TiC-C ile kaplama işlemi yapılmıştır. Mikroyapısal ve mekanik olmak üzere bazı testlere tabi tutulmuş olup elde edilen sonuçlar doğrultusunda, sektörel ve akademik çalışmalara aşağıda maddeler halinde verilen öneriler paylaşılmaktadır.

1. Kaplama tabakasının düzgün iyi bir metalurjik bağ ile bağlandığı herhangi bir gözenek, boşluk ve süreksizliğin oluşmadığı optik mikroskop ve SEM mikroyapı sonuçlarından gözlenmiştir.
2. Kaplama tabakası mikroyapısı soğuma ile birlikte ötektik, dendritik ve parçacıklı yapılardan

- meydana gelmiştir.
3. EDS sonuçlarına göre özellikle kaplama bölgesinde oluşan dendiritlerin ve parçacıklı yapıların Ti ve C baskın elementlerinden oluştuğu görülürken, ötektik bölgede ise daha çok Fe elementinin baskın olgu tespit edilmiştir.
 4. Kaplama bölgesinde yapılan XRD analiz sonucunda ise; tüm numunelerin yüzeyinde oluşan baskın fazın TiC fazı ile birlikte Fe_7C_3 , Fe_3C ve martenzit fazlarının olduğu, düşük pik değerlerinde $\alpha - Fe$ ve δFe fazlarının da oluştuğu tespit edilmiştir.
 5. Vickers sertlik analiz sonuçlarına göre C oranındaki artışa bağlı olarak kaplamaların mikrosertlik değerinde artış tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlara bağlı olarak kaplama tabakasında en düşük sertlik değerinin N1 (TiC) 1156 HV_{0,5} iken en yüksek sertlik değeri ise N6 (TiC-%5C) 1351 HV_{0,5} olarak ölçülmüştür.
 6. Aşınma test analiz sonuçlarına göre, artan C oranı ile mikrosertliğin ve aşınma direncinin arttığı, ağırlık kaybının ise azaldığı elde edilen sonuçlardan belirlenmiştir. En düşük aşınma direnci N1 numunesi iken en yüksek aşınma direnci ise N6 numunesi olarak tespit edilmiştir. Analiz sonuçlarında N1 numunesinde sürtünme katsayısı 0,6 iken N6 numunesinde ise 0,2 olarak elde edilmiştir. Aşınmış numunelerin SEM morfolojilerine ait görüntüleri incelendiğinde, aşınma bölgesinde meydana gelen oluk, pullanma, kopma ve döküntü gibi etkenlerden kaynaklandığı düşünülmektedir.

Teşekkür

Bu proje, Batman Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi (BTÜBAP) tarafından BTÜBAP-2022-YL-04 numaralı münferit proje kapsamında desteklenmiştir. Yapılan çalışmalara desteklerinden dolayı Batman Üniversitesi'ne teşekkür ederiz.

Kaynakça

- Akkaş, M., & Islak, S. (2019). Microstructure, wear and corrosion properties of NiB-TiC composite materials produced by powder metallurgy method. *Science of Sintering*, 51(3), 327-338. doi:10.2298/SOS1903327A
- Buytoz S. (2006). Microstructural properties of M7C3 eutectic carbides in a Fe-Cr-C alloy. *Materials Letters*, 60, 605-608. doi:10.1016/j.matlet.2005.09.046
- Buytoz, S. (2020). Microstructural changes of Fe-Cr-C/M(Nb,Ti)C composite coating produced by TIG method. *GU J Sci, Part C*, 8(1), 51-63. doi:10.29109/gujsc.637815
- Buytoz, S., Kilic, M., & Carboga, C. (2022). Microstructure and wear behaviour of Ni-based/TiC composite coating. *International Journal of Surface Science and Engineering*, 16(1), 71-90. doi:10.1504/IJSURFSE.2022.10045207
- Cai, B., Ye-fa, T., Tu, Y., Wang, X., & Tan, H. (2011a). Tribological properties of Ni-base alloy composite coating modified by both graphite and TiC particles. *Transactions Nonferrous Metals Society China*, 21, 2426-2432. doi:10.1016/S1003-6326(11)61031-5
- Cai, B., Ye-fa, T., Tu, Y., Wang, X., & Xu, T. (2011b). Effects of graphite content on microstructure and tribological properties of graphite/TiC/Ni-base alloy composite coatings. *Transactions Nonferrous Metals Society China*, 21, 1741-1749. doi:10.1016/S1003-6326(11)60924-2
- Chen, L., Tianxiang, X., Haiyang, W., Peng, S., Sheng, L., Ze-Xin, W., Shujin, C., & Lai-Chang Z. (2019). Phase interaction induced texture in a plasma sprayed-remelted NiCrBSi coating during solidification: An electron backscatter diffraction study. *Surface & Coatings Technology*, 358, 467-480. doi:10.1016/j.surfcoat.2018.11.019
- Çelik, Y. H., & Seçilmiş, K. (2017). Investigation of wear behaviours of Al matrix composites reinforced with different B₄C rate produced by powder metallurgy method. *Advanced Powder Technology*, 28(9), 2218-2224. doi:10.1016/j.appt.2017.06.002
- Demir, M. E., Çelik, Y. H., & Kalkanli, A. (2022a). The effect of rolling and aging on mechanical and tribological properties in B₄C particle reinforced Al7075 matrix composites. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 47(12), 16187-16208. doi:10.1007/s13369-022-06891-6
- Demir, M. E., Çelik, Y. H., Kilickap, E., & Kalkanli, A. (2022b). The effect of B₄C reinforcements on the microstructure, mechanical properties, and wear behavior of AA7075 alloy matrix produced

- by squeeze casting. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, 237(6), 2574-2584. doi:10.1177/09544089221139095
- Durmuş, H., Türkmen, M., & Çalgül, U. (2020). Farklı altlık malzemelerine uygulanan WC kaplamaların tribolojik özelliklerinin incelenmesi. *Technological Applied Sciences*, 15(2), 23-28.
- Emamian, A., Corbin, S. F., & Khajepour, A. (2011). The influence of combined laser parameters on in-situ formed TiC morphology during laser cladding. *Surface & Coatings Technology*, 206, 124-131. doi:10.1016/j.surfcoat.2011.06.062
- He, J., Zheng, G., Guo, F., Fu, G., Li, C., Zhao, H., ..., & Yin, F. (2020). Microstructure and tribological properties of in-situ synthesized TiC reinforced reactive plasma sprayed Co-based coatings. *Materials Chemistry and Physics*, 248, 122913. doi:10.1016/j.matchemphys.2020.122913
- Janicki, D. (2018). Microstructure and sliding wear behaviour of in-situ TiC-reinforced composite surface layers fabricated on ductile cast iron by laser alloying. *Materials*, 11(1), 75. doi:10.3390/ma11010075
- Khalili, A., Mojtahedi, M., Goodarzi, M., & Torkamani, M. J. (2019). Synthesis of Fe-TiC hard coating from ilmenite via laser cladding. *Iranian Journal of Materials Science and Engineering*, 16(3), 75-86. doi:10.22068/ijmse.16.3.75
- Kılıç, M., Beken, M., & Özdemir, N. (2019). SHS işlemi sonrası sinterleme işleminin intermetalik kaplamaya etkisinin incelenmesi. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 31(1), 167-176.
- Kılıç, M. (2021). Microstructural characterization of ni-based B₄C reinforced composite coating produced by tungsten inert gas method. *Arch. Metall. Mater*, 66(3), 917-924. doi:10.24425/amm.2021.136398
- Kılıç, M., Imak, A., & Kirik, I. (2021). Surface modification of AISI 304 stainless steel with NiBSi-SiC composite by TIG method. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 30(2), 1411-1419. doi:10.1007/s11665-020-05378-5
- Kılıçay, K., & Ulutan, M. (2017). Effect of cryogenic treatment on tribological behaviour of TiC composite coatings. *Surface Engineering*, 33(12), 886-894. doi:10.1080/02670844.2017.1317452
- Kurt, B., Küçük, Y., & Sabri Gök, M. (2014). Microabrasion wear behavior of VC and CrC coatings deposited by thermoreactive diffusion technique. *Tribology Transactions*, 57(2), 345-352. doi:10.1080/10402004.2014.880538
- Lailatul, P. H., & Maleque, M. A. (2017). Surface modification of duplex stainless steel with SiC preplacement using TIG torch cladding. *Procedia Engineering*, 184, 737-742. doi:10.1016/j.proeng.2017.04.151
- Ma, Y., Wang, X., Wang, X., Yang, Y., Cui, Y., & Sun, W. (2020). In-situ TiC-Ti₅Si₃-SiC composite coatings prepared by plasma spraying. *Surface & Coatings Technology*, 404, 126484. doi:10.1016/j.surfcoat.2020.126484
- Moghaddam, H. Z., Sharifitabar, M., & Roudini, G. (2019). Microstructure and wear properties of Fe-TiC composite coatings produced by submerged arc cladding process using ferroalloy powder mixtures. *Surface and Coatings Technology*, 361, 91-101. https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.01.053
- Oh, M. C., Yeom, H., Jeon, Y., & Ahn, B. (2015). Microstructural characterization of laser heat treated AISI4140 steel with improved fatigue behavior. *Arch. Metall. Mater*, 60(2B), 1331-1334. doi:10.1515/amm-2015-0125
- Ozel, S., Kurt, B., Somunkiran, I., & Orhan, N. (2008). Microstructural characteristic of NiTi coating on stainless steel by plasma transferred arc process. *Surface and Coatings Technology*, 202(15), 3633-3637. doi:10.1016/j.surfcoat.2008.01.006
- Rachidi, R., El Kihel, B., & Delaunois, F. (2019). Microstructure and mechanical characterization of NiCrBSi alloy and NiCrBSi-WC composite coatings produced by flame spraying. *Materials Science & Engineering B*, 241, 13-21. doi:10.1016/j.mseb.2019.02.002
- Rajkumar, K., & Aravindan, S. (2011). Tribological performance of microwave sintered copper-TiC-graphite hybrid composites. *Tribology International*, 44, 347-358. doi:10.1016/j.triboint.2010.11.008

- Rao, K. V. S., Girisha, K. G., Jamuna, K., & Tejaswini, G. C. (2018). Erosion behaviour of HVOF sprayed SiC-WC-Cr₃C₂ multilayer coating on 304 stainless steel. *Materials Today: Proceedings*, 5(11), 24685-24690. doi:10.1016/j.matpr.2018.10.266
- Rasool, G., & Stack, M. M. (2014). Wear maps for TiC composite based coatings deposited on 303 stainless steel. *Tribology International*, 74, 93-102. doi:10.1016/j.triboint.2014.02.002
- Rezapoor, M., Razavi, M., Zakeri, M., Rahimipour, M. R., & Nikzad, L. (2018). Fabrication of functionally graded Fe-TiC wear resistant coating on Ck45 steel substrate by plasma spray and evaluation of mechanical properties. *Ceramics International*, 44(18), 22378-22386. doi:10.1016/j.ceramint.2018.09.001
- Saba, F., Kabiri, E., Khaki, J. V., & Sabzevar, M. H. (2016). Fabrication of nanocrystalline TiC coating on AISI D2 steel substrate via high-energy mechanical alloying of Ti and C. *Powder Technology*, 288, 76-86. doi:10.1016/j.powtec.2015.10.030
- Shahroozi, A., Afsari, A., Khakan, B., & Khalifeh, A.R. (2018). Microstructure and mechanical properties investigation of stellite 6 and Stellite 6/TiC coating on ASTM A105 steel produced by TIG welding process. *Surface & Coatings Technology*, 350, 648-658. doi:10.1016/j.surfcoat.2018.07.044
- Tijo, D., & Masanta, M. (2018). In-situ TiC-TiB₂ coating on Ti-6Al-4V alloy by tungsten inert gas (TIG) cladding method. *Part-II. Mechanical performance, Surface & Coatings Technology*, 344, 579-589. doi:10.1016/j.surfcoat.2018.03.083
- Tijo, D., Waghmare, D. T., Kaladharan, D., & Masanta, M. (2018). Effect of TiC content on sliding wear behavior of TiC-Ti metal matrix composite. *Materials Today: Proceedings*, 5(9), 19848-19853. doi:10.1016/j.matpr.2018.06.349
- Xiao, M., Yuanwei, Z., Yaosha, W., Zhaoguo, Q., Cheng, Z., Shiye, Z., Min, L., & Dechang, Z. (2021). Preparation, mechanical properties and enhanced wear resistance of TiC-Fe composite cermet coating. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 101, 105672. doi:10.1016/j.ijrmhm.2021.105672
- Yue, H., Lv, N., Guo, C., Zhao, L., Li, Q., Zhang, J., & Zhang, Y. (2022). Microstructure and mechanical properties of TiC/FeCrSiB coating by laser additive remanufacturing on shearer spiral blade. *Surface and Coatings Technology*, 431, 128043. doi:10.1016/j.surfcoat.2021.128043
- Zabihi, A., & Soltani, R. (2018). Tribological properties of B₄C reinforced aluminum composite coating produced by TIG re-melting of flame sprayed Al-Mg-B₄C powder. *Surface and Coatings Technology*, 349, 707-718. doi:10.1016/j.surfcoat.2018.06.040
- Zhang, H., Lian, G., Cao, Q., Pan, Y., & Zhang, Y. (2022). Microstructure and mechanical properties investigation of Ni₃₅A-TiC composite coating deposited on AISI 1045 steel by laser cladding. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 118, 1269-1282. doi:10.1007/s00170-021-08011-4
- Zhao, Y., Yu, T., Chen, L., Chen, Y., Guan, C., & Sun, J. (2020a). Microstructure and wear resistance behavior of Ti-C-B₄C-reinforced composite coating. *Ceramics International*, 46(16), 25136-25148. doi:10.1016/j.ceramint.2020.06.300
- Zhao, Y., Yu, T., Sun, J., & Jiang, S. (2020b). Microstructure and properties of laser cladded B₄C/TiC/Ni-based composite coating. *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials*, 86, 105112. doi:10.1016/j.ijrmhm.2019.105112