

Araştırma Makalesi

TiB2-VC Tozu ile Kaplanan St52 Çeliğinin Mikroyapı ve Aşınma Davranışlarının İncelenmesi

Musa Kılıç¹ , Anıl İmak^{2,*}  ve İhsan Kırık³ 

Gönderim: 27.05.2025

Kabul: 04.06.2025

¹Kaynak Teknolojisi Programı, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, Batman Üniversitesi, Batman, Türkiye; musa.kilic@batman.edu.tr

²Makine Mühendisliği Bölümü, Bingöl Üniversitesi, Bingöl, Türkiye; aimak@bingol.edu.tr

³Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, Bingöl Üniversitesi, Bingöl, Türkiye;

ikirik@bingol.edu.tr

*Sorumlu yazar

Özet: Çeliklerde aşınmaya bağlı olarak zamanla hasarlar meydana gelmektedir. Bu hasarlar kaplama yöntemleri ile giderilebilir. Bu çalışmada yüzey aşınma direnci düşük St 52 çelik yüzeyi TiB2 matris içerisinde ağırlıkça %1 ve %5 VC (Vanadyum Karbür) ilave edilerek hazırlanan TiB2-VC karışım tozu kullanılarak TIG(Tungsten Inert Gas) yöntemi ile kaplanmıştır. Kaplama ve alt tabaka arasında mükemmel bir ara yüz oluşması metalurjik olarak iyi bir bağlanmanın gerçekleştiğini göstermektedir. Oluşan karbür ve borür fazlarının sayesinde mikrosertlik değeri ve aşınma direnci artmıştır. Mikrosertlik ölçümlerinde C2 numunesinde kaplama bölgesinde 1291 HV0.5, C1 numunesinde ise kaplama bölgesinde 1193 HV0.5 ölçülmüştür. Aşınma direnci mikrosertlik artışı ile bağlantılı olarak en düşük C2 numunesinde elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: St52; TIG; TiB2-VC; mikroyapı; aşınma

Research Article

Investigation of Microstructure and Wear Behavior of St52 Steel Coated with TiB2-VC Powder

Abstract: In steels, damage occurs over time due to wear. These damages can be repaired using coating methods. In this study, the surface of St 52 steel, which has low wear resistance, was coated using the TIG (Tungsten Inert Gas) method with a TiB₂-VC mixed powder. This powder was prepared by adding 1% and 5% VC into a TiB₂ matrix. A perfect interface formed between the coating and the substrate, indicating a good metallurgical bond. Due to the formation of carbide and boride phases, microhardness and wear resistance increased. In microhardness measurements, the coating region of sample C2 had a value of 1291 HV0.5, while the coating region of sample C1 showed 1193 HV0.5. As a result of the increase in microhardness, the highest wear resistance was obtained in sample C2.

Keywords: St52; TIG; TiB2-VC; microstructure; wear

1. Giriş

Teknolojinin hızlı gelişmesine bağlı olarak hammaddeye ihtiyaç her geçen gün artmaktadır. Ancak dünyamızda kaynakların sınırlı olması ve artan nüfus yoğunluğuna bağlı olarak giderek azalması daha ergonomik malzemelerin üretim ve imalatını zorunlu bir hale getirmiştir. Makine imalat endüstrisinde makine ve parçalarının kullanıldıkları süre ve ortama bağlı olarak mekanik (aşınma, yorulma) ve kimyasal(korozyon) tahribatlar yaşanabilmektedir.

Metal yüzeylerinde meydana gelen bu tahribatları minimum düzeye indirmek için gelişen yüzey mühendisliği metal yüzeylerinde metal matris kompozit oluşturarak sert, aşınma ve korozyona dirençli yüzeyler ve alt tabakanın ise sünek ve yeterli mukavemete olması istendiğinde tercih edilmektedir [1].

Yüzey modifikasyon tekniği ile aşınma, korozyon, yorulma direnci iyi ve daha iyi mekanik özelliklere sahip yüzeyler elde etmek metal yüzeylerinde MMK (metal matrisli kompozitler) kaplamalar oluşturmak için etkili ve düşük maliyetli yöntemdir[2], [3].

MMK kaplamalar oluşturmak için TRD, HVOF, plazma sprey ve lazer yöntemler yaygın bir şekilde kullanılmaktadır [4]-[7]. Diğer yöntemlere kıyasla TIG yöntemi ile kaplama işlemi donanımının yaygın olması, ekipman maliyetlerinin düşük olması, aynı zamanda kaplama kalınlığı, kimyasal bileşimi ve mekanik özelliklerinin kontrolünün kolay olması ve metalurjik olarak alt tabakaya iyi bağlanması kullanımını yaygınlaştırmıştır. TIG kaplama yönteminde malzemelerin üst kısmına açılan kanala toz karışımlarının yerleştirildikten sonra ergiterek yüzey özelliklerinin artırıldığı ayrıca diğer seramik kaplama yöntemleri ile zor olan kaplama işlemleri bu yöntem ile kolaylıkla yapılabilmektedir [8]-[10].

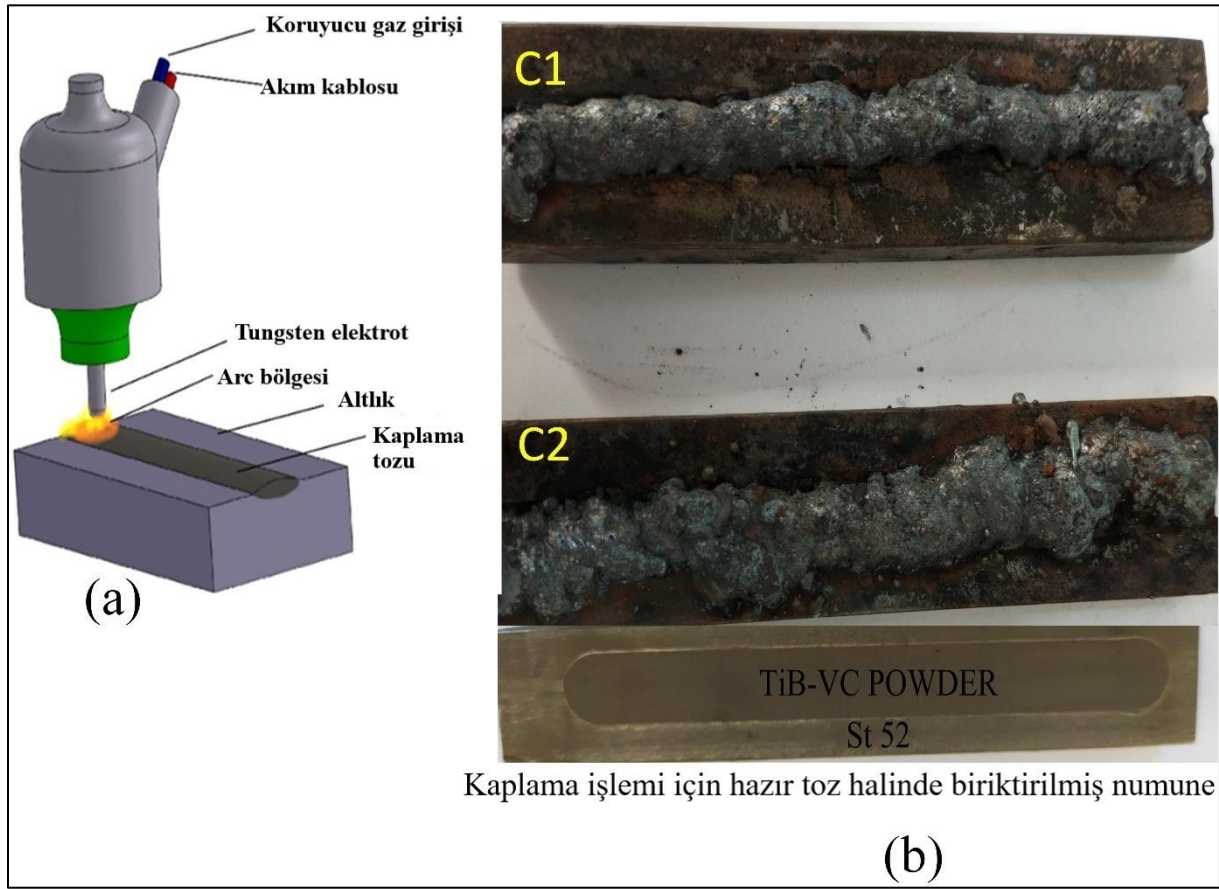
Sert karbür (VC, SiC, B4C) ve borürler(TiB2) alt tabaka yüzeylerine ilave edilerek mikroyapı ve mekanik özellikler olarak yüksek sertlik, yüksek tokluk ve aşınmaya dirençli MMK kaplamalar oluşturulabilir [11]-[13].

Bu takviyelerden VC ve TiB2 yüksek ergime noktası, yüksek sertlik, yüksek aşınma direnci, yüksek korozyon direnci, iyi termal ve elektriksel iletkenliğine sahip karakteristik özelliklerinden dolayı metal yüzeylerinde kaplamalar oluşturmak için araştırmacılar tarafından yaygın bir şekilde kullanılmaktadır [14]-[16].

TIG kaplama kullanılarak orta karbonlu çeliğin farklı türde (VC ve TiB2) tozların daha önce herhangi bir araştırmaya konu olmadığı görülmüştür. Bu doğrultuda farklı türde ve özelliklere sahip tozların çelik yüzeyine kaplanması ve mikroyapı ile mekanik özelliklerinin araştırılması bu çalışmaya amaç olmuştur.

2. Materyal ve Metot

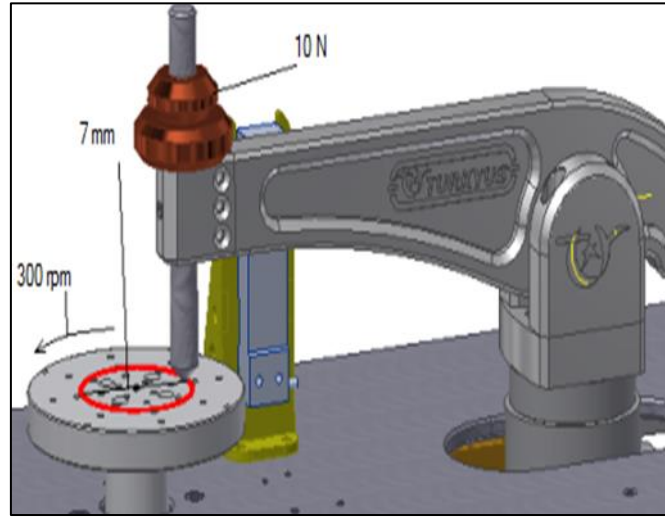
Bu çalışmada orta karbonlu çelik yüzeyi TIG yöntemi kullanılarak TiB2-VC tozu ile kaplanmıştır. St52 çeliği 100x25x10mm ebatlarında kesilerek dikey freze ile yüzeyinde 6 mm genişliğinde 1.5 mm derinliğinde kanal açılmıştır. Kanal açma işlemi sonrası alt tabaka yüzeyi kir ve empürilerden temizlemek için alkol banyosuna daldırılmıştır. Kaplama tozu olarak Titanyum Borür (TiB2) < 10 µm; CAS-12045-63-5; Parti No: 336289-50G Sigma Aldrich firmasından, VC (ortalama tane boyutu ~45 µm) tozu BC firmasından temin edilmiştir. TiB2 matris içeresine ağırlıkça %1 (C1) ve %5 (C2) VC tozu ilave edilerek karıştırma cihazında homojen bir karışım elde etmek için karıştırılmıştır. Karışım tozlar alkol ile bulamaç haline getirilerek oda sıcaklığında 24 saat bekletildikten sonra alt tabaka yüzeyine yatırılmıştır. TIG (Oerlicon-Magic Wave 2200) kaynak makinesi ve % 2 toryumlu tungsten elektrod yardımıyla kaplama işlemi 90 A akım kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Şekil 1’de TIG kaplama yönteminde ait şematik resim, kaplama öncesi ve kaplama sonrası numunelere ait resim verilmiştir.



Şekil 1. TIG kaplama yöntemine ait şematik resim, kaplama öncesi (a) ve kaplama sonrası numunelere ait resim (b).

Kaplanan numuneler kaplama yüzeyine dik doğrultuda kesildikten sonra bakalite alınmıştır. Kesilen numuneler kaba ve ince parlatma işlemine tabi tutulmuştur. Kaba zımparalama işleminde numuneler farklı boyutlardaki SiC zımparalar ile hazırlanmıştır. İnce parlatma işleminde ise 1 μ elmas pasta ile parlatılmıştır. Kaplama ile altlık arasında oluşan mikroyapı ve yapısal geçişleri tespit etmek için Nikon TESCANA MIRA3 XMU marka optik mikroskop ve enerji dispersif spektrometri (EDS) cihazı kullanılmıştır. XRD analizinde ise 20–90 ° tarama aralığı, 0.02 ° adım boyutu ve dakikada 10 ° 'lık bir tarama hızı göz önüne alınarak cobalt hedefte ($\lambda = 1.79026 \text{ \AA}$) Rigaku RadB-DMax II difraktometre analizleri yapılmıştır. Kaplamanın mikrosertlikleri 10 saniye süreyle 50 gf yük altında, Future Tech FM-700 mikrosertlik test cihazı kullanılarak 9 noktadan ölçülmüştür.

Numuneler Şekil 2'de verilmiş olan Turkey Podwt marka pin-on disk yardımıyla aşınma işlemine tabii tutulmuştur. Aşınma parametreleri daha önceki çalışmalar dikkate alındıktan sonra uygulanan yük 15 N, kayma hızı 0,4 m/s seçilmiş olup ön deneyler yapıldıktan sonra seçilmiştir.



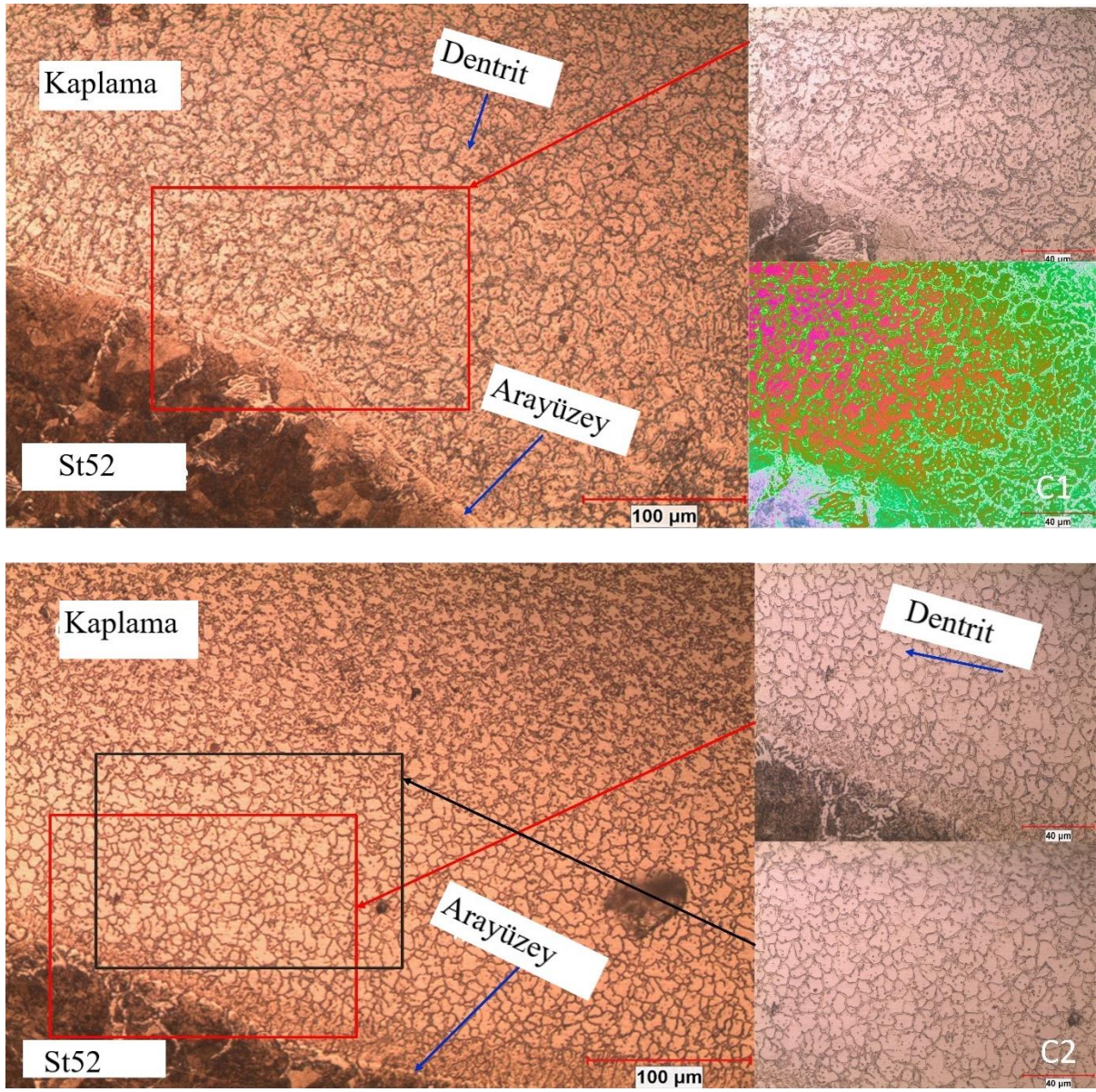
Şekil 2. Turkyus Podwt marka pin-on disk aşınma cihazı şematik resmi

3. Bulgular ve Tartışma

3.1. Optik Analizi

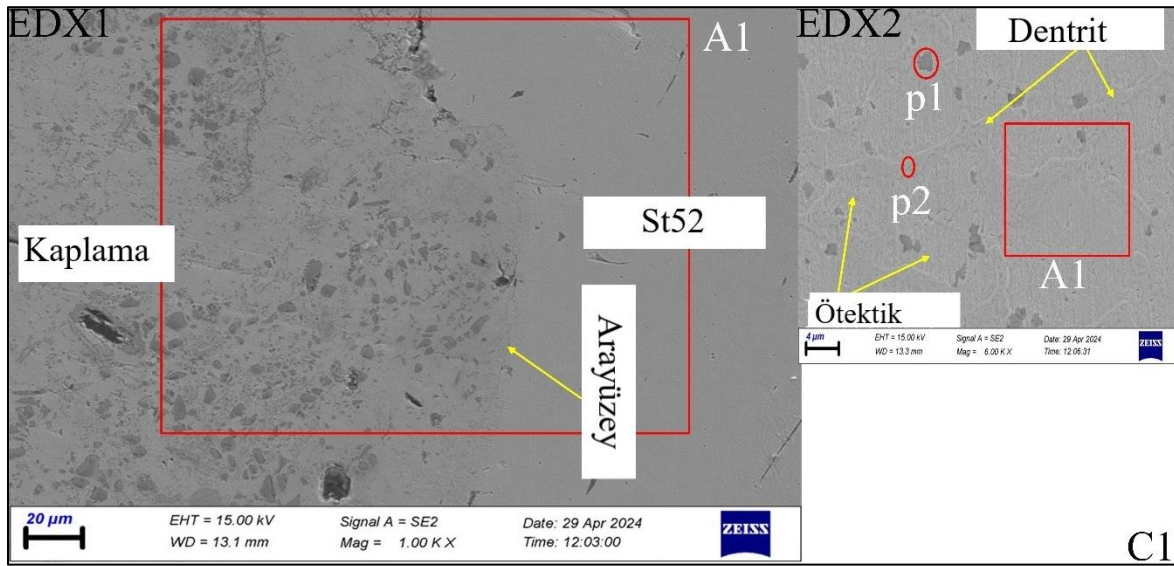
TiB-VC tozları kullanılarak ST52 yüzeyi TIG(Tungsten Inert Gas) yöntemi kullanılarak yüzey modifikasyon işlemi gerçekleştirilmiştir. Yüzey modifikasyonu yapılan numunelere ait optik resimleri Şekil 3'te verilmiştir. C1 numunesine ait optik mikroyapı resiminde üç bölgenin varlığı görülmektedir. Bu bölgeler arayüzey, alt tabaka bölgesi ve kaplama tabakasından oluşmaktadır. Arayüz bölgesinin düz bir bant şeklinde ilerlediği görülmüş ve hiçbir gözenek ve çatlak gözlenmemiştir. Alt tabaka bölgesinin feritik ve perlitik yapıdan oluştuğu gözlenmiştir. Kaplama bölgesi ise dendirit ve ötektik yapıdan oluştuğu özellikle arayüz bölgesinin hemen altındaki kaplama bölgesinde sütunsal dendritler gözlenirken, kaplamanın üst kısmına doğru ise daha çok hücreli yapı sergilemiştir. Daha çok kaynak ergitme yöntemlerinden lazer ışını, elektron ışını, TIG vb. ile yapılan yüzey modifikasyon çalışmalarında dentritik yapılar arkın başlamasıyla birlikte kaplama tabakasından oluşan sıvı ergiyik banyosunun hızlı bir şekilde katılaşması sonucu oluşur.

Şekil 3'te C2 numunesinde ise C1 numunesinde olduğu gibi alt tabaka feritik ve perlitik yapılarından oluşmuştur. Kaplama tabakasından herhangi bir çatlak ve gözenek vb. olumsuzluklar gözlenmemiştir. Arayüz bölgesinden kaplama tabakasından orta kısmına kadar hücreli dendritler yoğun oluşurken kaplama bölgesinin üst kısmında ise dağınık bir yapı sergilemiştir. Arayüz bölgesi düzgün bir bant şeklinde ilerlemiştir. Bu alt tabakaya yerleştirilen tozların erimesi için TIG yöntemi ile başlatılan ark yeterli bir enerji girisi sağlayarak tozları erittiği ve kaplama tabakasından alt tabakaya nüfuz ederek düzgün bir bağlanma sağlamıştır.



Şekil 3. Kaplamalara ait mikroyapı resimleri

3.2. SEM-EDS Analizi



Şekil 4. %1 VC takviyeli kaplama numunesi SEM ve EDX görüntüleri

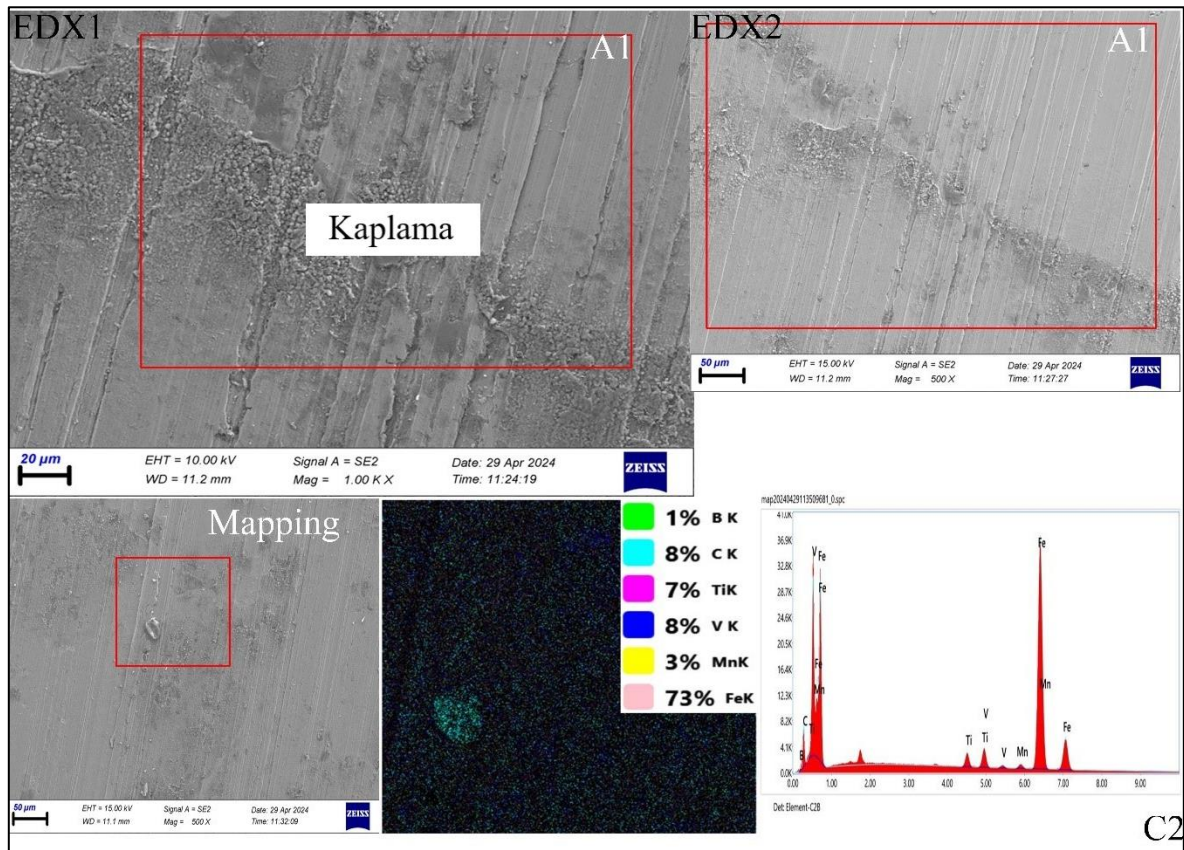
Tablo 1. %1 VC takviyeli kaplama numunesine ait EDX sonuçları

Numune	Spectrum	Kimyasal Bileşimi %wt.					
C1		B	C	Ti	Mn	Fe	V
(EDX1)	A1	3.88	3.16	14.17	-	77.78	1.01
C1 (EDX2)	P1	1.20	12.25	71.31	-	15.25	-
	P2	3.74	2.20	2.13	1.69	90.24	-
	A1	1.20	2.40	1.35	1.46	93.59	-

Kaplamalara ait SEM -EDS sonuçları Şekil 4, Şekil 5, Tablo 1 ve Tablo2’de verilmiştir. Kaplama tozunun erime sonrası hızlı soğumasıyla birlikte ara yüzey çizgisinin düzensiz bir şekil aldığı tespit edilmiştir(Şekil 4). Kaplama tabakası ve alt tabakanın belirgin bir şekilde ayrıştığı açıktır. Ara yüzey bölgesinin ise koyu gri partikül yoğunluğu olduğu ve bu partiküllerin alt tabakaya doğru yöneldiği gözlenmiştir. Ayrıca arayüz bölgesinin düzgün bir yapı sergilediği ve hat boyunca herhangi bir gözenek ve çatlak formunun olmadığı aşıkardır. Bu sonuca bağlı olarak kaplama ve alt tabaka arasında metalurjik bir bağın olduğu açıktır.

Kaplama tabakasında dendritik ve ötektik yapı sergilemiştir(Şekil 5). Metal ve alaşım elementleriyle yapılan kaplamalarda katılaşma ile birlikte en sık gözlenen mikroyapılardan biri dendritik yapılarıdır[17]. Bu yapılar soğutmanın hızlı bir şekilde gerçekleştiği durumlarda ince dendritik kollar yavaş soğutma durumunda ise kaba yapıli dendritler üreterek malzemelerin mikroyapısal özelliklerini etkilerler.

C1 nolu numuneye ait EDS sonuçlarında tüm elementlerin varlığı tespit edilmiş ancak alt tabakaya doğru daha fazla taramanın yapılması neticesinde Fe elementinin daha yoğun olduğu belirlenmiştir. Bu bölgede Fe elementi ile birlikte Ti, B, C ve V elementlerinin varlığı tespit edilmiştir. Bununla birlikte aynı numunenin kaplama tabakasında alınan C2 nolu numunenin EDS sonuçlarında ise elementlerin oranları değişmiştir. Özellikle P1 noktasından alınan sonuçlarda Ti %71.31, C %12.25 gibi yüksek değerler elde edilmiştir. Tablo EDS sonuçlarında ise tüm elementlerin (V, Ti, C ve B) varlığının bulunduğu, bununla birlikte demirin daha yoğun olduğu gözlenmiştir. Kaplama tabakasında bulunan partiküllülerin TiC ve TiB fazlarına işaret ettiği düşünülmektedir. EDS sonuçlarında görüldüğü gibi koyu gri dentritik yapıların her iki numuneye ait EDS sonuçlarında Ti, C elementleri yoğunken gri bölgelerin ise ötektik bölgelerinde Ti, C ve Fe yoğun elementlerde olduğu gözlemlenmiştir. Kaplama bölgesinde meydana gelen bu karbürler mikrosertlik ve aşınma direnci gibi malzeme özelliklerini önemli bir şekilde etkilediği daha önce yapılmış olan çalışmalarda belirtilmiştir[18],[19]. Buytoz yaptığı çalışmada karbürlerin tipi (M7C3, TiC, VC), miktarı ve morfolojisi mikroyapıyı doğrudan etkilediğini belirtmiş ve bu etkiyi hem faz oluşumu hem de kaplama kalitesi açısından incelenmiştir. Ti ve V katkısı ile oluşturulan kompleks karbürler daha ince ve homojen yapı ile birlikte yüksek oksidasyon direnci ve dolaylı olarak sertliğe pozitif katkı sağladığından bahsetmiştir [20].



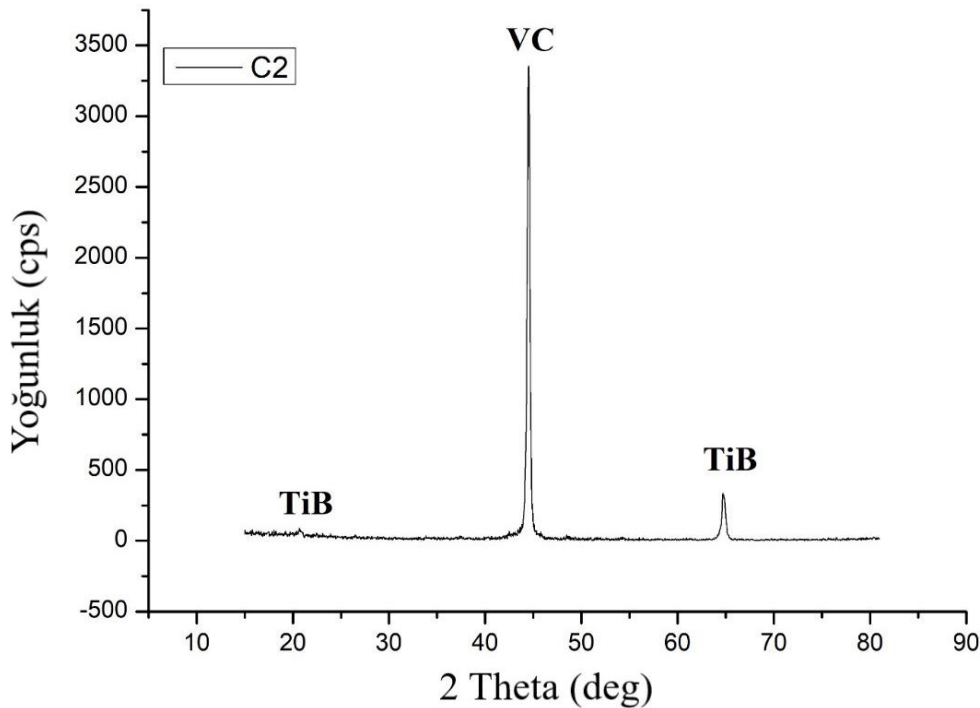
Şekil 5. %5VC takviyeli kaplama numunesi SEM ve EDS görüntüleri

Tablo 2. %5 VC takviyeli kaplama numunesine ait EDX sonuçları

Numune	Spectrum	Kimyasal Bileşimi %wt.					
		B	C	Ti	Mn	Fe	V
C2 (EDX1)	A1	2.11	8.27	1.61	1.31	83.86	2.84
C2 (EDX2)	A1	1.90	7.24	1.08	-	87.37	2.41

3.3. XRD Analizi

C2'ye ait XRD analiz sonucu Şekil 6'da gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlarda TiB fazının düşük pikler sergilediği en yüksek pike ise VC fazının sahip olduğu tespit edilmiştir. oluşmuştur. EDS analizlerinde C, B, Ti ve V elementlerinin varlığı yapı içerisinde bu tür fazların oluşmasını sağlayabilir. Arkın başlamasıyla birlikte kaplama tabakasındaki V elementinin ergiyik havuzu içerisinde alt tabakadan gelen C ile soğuma esnasında birleşerek VC fazının oluşmasına katkı sunduğu düşünülmektedir. Ke vd. [12] yapmış olduğu çalışmada benzer fazların yapıda oluştuğunu ifade etmiştir. Yapıda oluşan karbür ve borür esaslı fazlar kaplama tabakasının sertliğinin artmasını sağlayarak mekanik özellikle katkı sunar.

**Şekil 6.** C2 numunesine ait XRD analiz sonucu

3.4. Sertlik ve Aşınma Analizi

Numunelere ait sertlik ve aşınma grafikleri Şekil 7 ve Şekil 8’de verilmiştir. Elde edilen sonuçlarda en yüksek sertliğin kaplama tabakasında, en düşük sertliğin ise alt tabakada elde edilmiştir (Şekil 7). Kaplama tabakasında ve ara yüz bölgesinde sertliğin artmasının temel nedeni olarak yapıda oluşmuş sert karbür ve borür fazlarından dolayıdır. Mikrosertlik ölçümlerinde elde edilen en yüksek sertlik değeri C2 numunesinde kaplama bölgesinde 1291 HV, ara bölgede 851 ve alt tabakada ise 431 HV olarak ölçülmüştür. C1 numunesinde ise kaplama bölgesinde 1193 HV, ara bölgede 695 ve alt tabaka bölgesinde ise 485 HV olarak ölçülmüştür.

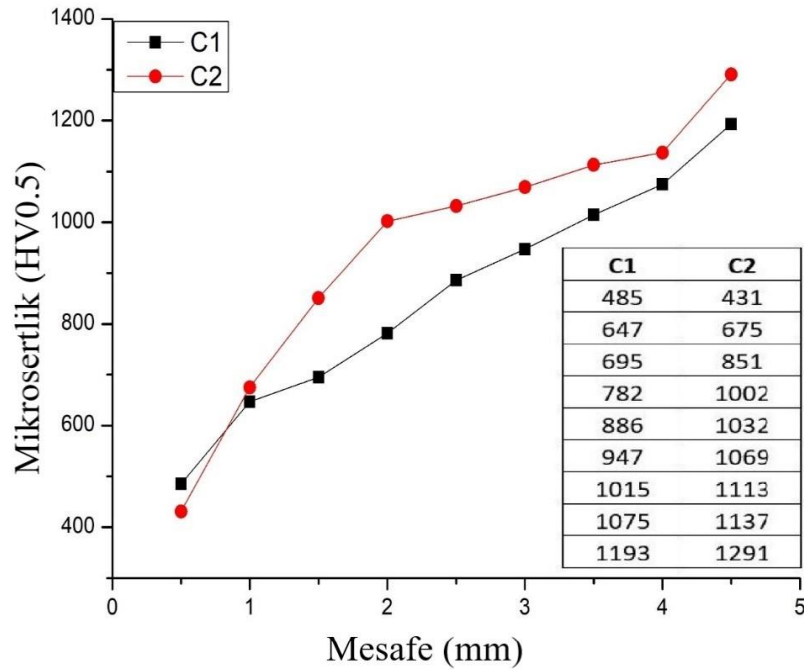
Shin vd. [21] Bu çalışmada, düşük karbonlu çelik alt tabaka ile TiC, TiB₂ ve VC seramik parçacıklarının yüzey alaşımlanması 1,4 MeV’lik HEEB kullanılarak gerçekleştirilmiştir. VC yüzey alaşımlı numune için mekanik özelliklerde dikkate değer bir artış gözlemlendi. Vanadyum karbürler düzgün bir şekilde oluşmuş olması, matrisin sertliğinin 2-3 katına kadar bir sertlik artışı ve en yüksek aşınma direnci ile sonuçlandığını ifade etmişlerdir.

Litaratür araştırması değerlendirildiğinde kaplama bölgesinde sertliğin artışının benzer olduğu ve artan sertliğin karbür ve borür fazlarına atfedilebileceği ifade edilmiştir.

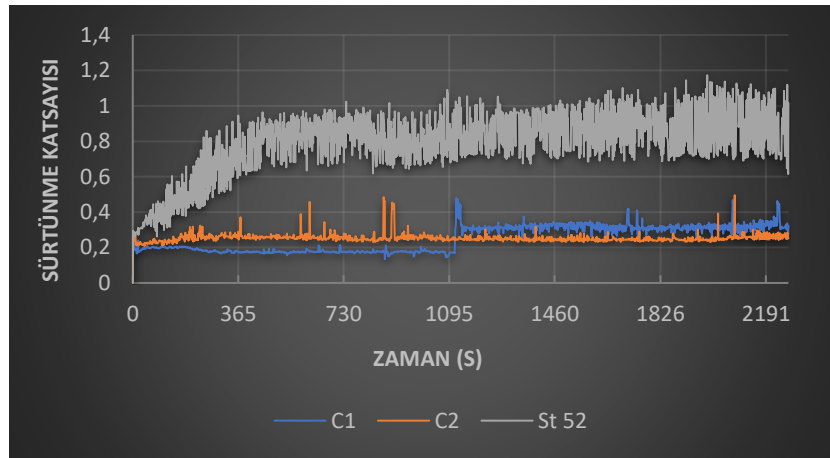
Şekil 8 aşınma diyagramında kaplama tabakasının daha düşük bir aşınma sergilediği aşınma direncinin arttığı alt tabakada ise aşınma direncinin düşük olduğu görülmektedir. Mikrosertlik sonuçlarıyla birlikte değerlendirildiğinde mikrosertliğin artmasına paralel olarak aşınma direnci artmıştır. Ancak aşınma direnci ile mikrosertlik arasında doğru orantı olsa da sürtünme katsayısı ile ters orantıya sahiptir. Sürtünme katsayısı düşük aynı zamanda 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.

Aramid vd. [22] lazer yöntemini kullanarak çelik alt tabaka yüzeyi FeCrV15 + TiB₂ kapladı. Tribolojik değerlendirmeler, tüm kaplamaların çelik alt tabaka ile karşılaştırıldığında daha iyi aşınma önleyici özellikler sergilediğini, karbür parçacıklarının artan yakınsamasına ve daha yüksek tane sınırı yoğunluğuna atfedildi.

VC ilavesi aşındırıcı aşınma direncini iyileştirmek için sertliği artırabilir ve ayrıca kimyasal afinitiyi ve konsantrasyon gradyanını azaltarak yapışma aşınması ve difüzyon aşınmasını engelleyebilir [12,15]. C2 numunesinde sürtünme katsayısının düzgün bir şekilde ilerlediği görülmektedir. Ancak C1 numunesinde belli bir zaman aralığında %50 oranında arttığı görülmektedir. Her iki numunede bazı bölgelerde piklerin yükseldiği bununda yüzeyde meydana gelen kopmalardan kaynaklandığı açıktır. VC ilavesi ile yapılan yüzey alaşımlama ile yüzey tabakasının sertliğini ve aşınma direncini belirgin şekilde iyileştirdiği görülmektedir. VC ve TiB₂ esaslı yapılan diğer çalışmalarda da mikrosertliğin arttığı aşınma direncinin de sertlik ile paralel yönde arttığı daha önce yapılan çalışmalarda diğer araştırmacılar tarafından da ifade edilmiştir [23]-[29].



Şekil 7. Numunelere ait mikrosertlik ölçüm grafiği



Şekil 8. Kaplamalara ait aşınma grafiği

4. Sonuç

Bu çalışmada St 52 çelik yüzeyi TiB₂-VC tozları kullanarak TIG yöntemi ile kaplanmıştır. Kaplama sonrası numunelere optik mikroskop, SEM-EDX ile mikroyapı, sertlik ve aşınma ile mekanik özellikleri incelenmiş ve karakterize edilmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmıştır;

1. TIG yöntemi ile düzgün ara yüzeye sahip kaplamalar elde edilebilir.
2. Kaplamaların mikroyapıları dentritik ve ötektiklerden oluşmuştur.
3. Kaplama bölgesinde oluşan fazlar sert borür ve karbür fazlarından TiB₂ ve VC oluşmuştur.
4. Kaplama bölgesinde gözenek ve çatlak gibi süreksizlikler oluşmamıştır.
5. Elde edilen sonuçlarda en yüksek sertliğin kaplama tabakasında, en düşük sertliğin ise alt tabakada elde edilmiştir. C2 numunesinde kaplama bölgesinde 1291 HV, ara bölgede 851 HV0.5 ve alt tabakada

ise 431 HV0.5 olarak ölçülmüştür. C1 numunesinde ise kaplama bölgesinde 1193 HV0.5, ara bölgede 695 HV0.5 ve alt tabaka bölgesinde ise 485 HV0.5 olarak ölçülmüştür.

6. C2 numunesinde sürtünme katsayısının düzgün bir şekilde ilerlediği görülmektedir. Ancak C1 numunesinde belli bir zaman aralığında %50 oranında arttığı görülmektedir.

Teşekkür

Yazarlar, *International Journal of Pure and Applied Sciences* dergisinin hakemlerine ve dergi kurullarına teşekkür eder.

Çıkar Çatışması

Yazarlar bu makaleyle ilgili herhangi bir çıkar çatışması olmadığını bildirirler.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yazarlar bu çalışmanın araştırma ve yayın etiğine uygun olduğunu beyan ederler.

References

- [1] S. Islak, C. Özorak, C.T. Sezgin ve M. Akkaş, “Effect of boron on micro structure and microhardness properties of Mo-Si-B based coatings produced via TIG process”, *Archives of Metallurgy and Materials*, vol. 61, no. 3, pp. 1234–1241, Sep. 2016. doi: 10.1515/amm-2016-0248.
- [2] E. Ünal, A. Yaşar ve I.H. Karahan, “Ni-B/TiB₂ Elektrodolanmış kompozit kaplamaların korozyon dayanımlarının belirlenmesi”, *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, vol. 36, no. 3, pp. 709–718, 2021.
- [3] A.A. Olewi ve A.S.J. Jilabi, “The Effects of travel speed of tungsten inert gas cladding of tungsten carbide and nickel composites on the microstructure of stainless steel”, *Advances in Science and Technology. Research Journal*, vol. 18, no. 4, pp. 123–131, 2024. doi: 10.12913/22998624/188642.
- [4] M. Kılıç ve E. Korkmaz, “Kaplama kalınlığına parametrelerin etkisi”, *Batman Üniversitesi Yaşam Bilimleri Dergisi*, vol. 13, no. 2, pp. 28–35, 2023.
- [5] S. Özel, “Microstructure and mechanical properties of HVOF sprayed WC-Co/NiCrBSi, Cr₃C₂ coatings on Al alloys”, *Materials Testing*, vol. 55, no. 9, pp. 694–700, 2013.
- [6] S. Özel ve E. Vural, “The microstructure and hardness properties of plasma sprayed Cr₂O₃/Al₂O₃ coatings”, *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*, vol. 18, no. 11–12, pp. 1052–1056, 2016.
- [7] H. Durmuş, N. Çömez, C. Gül, M. Yuddaşkal, ve R.O. Uzun, “Ferromolibden ve ferrobor takviyeli lazer kaplamaların aşınma karakteristiği ve mikroyapısı”, *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, vol. 10, no. 3, pp. 1009–1017, 2019.
- [8] S. Buytoz, M. Kilic, ve C. Carboga, “Microstructure and wear behaviour of Ni-based/TiC composite coating”, *International Journal of Surface Science and Engineering*, 16(1), 71-90, 2022.
- [9] A. Imak, I. Kirik, ve M. Kilic, “Comparison of microstructure and wear behaviors of PTA coated AISI 304 with alumina, boron and ekaboron III powder”, *Materials Testing*, 64(4), 541-549, 2022.
- [10] M. Aslam, G.K. Chandan, ve B.K. Kanchan, “Development of SiC ceramic reinforced composite interlayer cladding with AISI304 stainless steel wire on low carbon steel substrate using TIG cladding process”, *Silicon*, 15(18), 7733-7743, 2023.
- [11] M.S. Alam, ve A.K. Das, “Research progress in gas tungsten arc cladding on steel: a critical review”, in *Recent Advances in Manufacturing Processes and Systems: Select Proceedings of RAM 2021*, 859-867, Singapore: Springer, 2022, pp. 859–867. doi: 10.1007/978-981-16-7787-8_68.
- [12] D. Ke, Y. Pan, Y. Xu, P. Wang, ve R. Wu, “VC and Cr₃C₂ doped WCoB-TiC ceramic composites prepared by hot-pressing”, *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, vol. 68, pp. 24–28, 2017. doi: 10.1016/j.ijrmhm.2017.08.041.

- [13] F. Gong, J. Zhao, G. Liu, ve X. Ni, “Design and fabrication of TiB₂–TiC–Al₂O₃ gradient composite ceramic tool materials reinforced by VC/Cr₃C₂ additives”, *Ceramics International*, vol. 47, no. 14, pp. 20341–20351, 2021. doi: 10.1016/j.ceramint.2021.04.042.
- [14] B. Nayebe, S.A. Delbari, M.S. Asl, E. Ghasali, N. Parvin, ve M. Shokouhimehr, “A nanostructural approach to the interfacial phenomena in spark plasma sintered TiB₂ ceramics with vanadium and graphite additives”, *Composites Part B: Engineering*, vol. 222, Art. no. 109069, 2021. doi: 10.1016/j.compositesb.2021.109069.
- [15] N.K. Paraye, P.K. Ghosh ve S. Das, “A novel approach to synthesize surface composite by in-situ grown VC reinforcement in steel matrix via TIG arcing”, *Surface and Coatings Technology*, vol. 399, Art. no. 126129, 2020. doi: 10.1016/j.surfcoat.2020.126129.
- [16] F. Akkurt, E. Kalender, ve A. Yörükoğlu, “Üstün özelliklere sahip ileri teknoloji seramiği: Tityum diborür”, *Journal of Boron*, vol. 4, no. 4, pp. 203–208, 2019. doi: 10.30728/boron.614471.
- [17] A. Imak, “Coating of AISI 304 stainless steel surface with addition of Cr₃C₂ to NiCrCo medium entropy alloy powder”, *Materials Testing*, vol. 67, no. 6, pp. 1038–1045, 2025.
- [18] M. Yildirim Beltir, A. Imak, I. Kirik, A. Turgut ve V. Koc, “Microstructure and wear properties of NiTi–XSiC coating of AISI 1020 by SHS”, *Materials Testing*, 67(2), vol. 67, no. 2, pp. 386–396, 2025. doi: 10.1515/mt-2024-0240.
- [19] F. Bulut, A. Imak ve I. Kirik, “Comparison of Ni-based SiC and B₄C reinforcements on a TIG-coated AISI 1040 steel”, *Materials Testing*, vol. 67, no. 1, pp. 49–60, 2025.
- [20] S. Buytoz, “Effect on high temperature oxidation behavior of vanadium and titanium element in FeCrC coating”, *Transactions of the Indian Institute of Metals*, vol. 75, pp. 3149–3157, 2022. doi: 10.1007/s12666-022-02669-4.
- [21] K.S. Shin, J.H. Yoo, S.H. Lee, K. Kaneko ve Y. Tomokiyo, “Microstructural and mechanical properties of TiC, TiB₂ and VC with low carbon steel surface alloy fabricated by high energy electron beam irradiation”, *In Materials Science Forum*, vols. 475–479, pp. 3927–3930, 2005.
- [22] B.P. Aramide, T. Jamiru, T.A. Adegbola, et al., “Influence of TiB₂ incorporation on microstructural evolution in laser-clad FeCrV15 + TiB₂ deposits”, *Journal of Materials Engineering and Performance*, vol. 33, pp. 9861–9869, 2024. doi: 10.1007/s11665-024-09518-1.
- [23] Ü.A. Usca, S. Şap, M. Uzun ve Ü. Değirmenci, “Determination of mechanical and tribological properties of vacuum sintered hybrid reinforced Al–4Cu composites”, *Journal of Composite Materials*, vol. 58, no. 26, pp. 2799–2815, 2024. doi.org/10.1177/00219983241283599.
- [24] S. Şap, Ü. Değirmenci, Ü.A. Usca ve M. Uzun M, “Tribological behaviors and mechanical properties of novel Al–5Cu hybrid composites under dry sliding conditions”, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, vol. 238, no. 15, pp. 7690–7704, 2024. doi: 10.1177/0954406224123456.
- [25] S. Şap, Ü. Değirmenci ve Ü.A. Usca, “Impact of boron nitride and silicon carbide on tribological properties of Al–3Gr-based hybrid composites”, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, vol. 45, Art. no. 510, 2023. doi: 10.1007/s40430-023-04000-0.
- [26] S. Şap, “Mechanical and tribological behaviour of novel Al–12Si-based hybrid composites”, *Materials Testing*, vol. 65, no. 4, pp. 560–577, 2023. doi: 10.1515/mt-2023-0075.
- [27] S. Şap, Ü.A. Usca, M. Uzun, K. Giasin ve D.Y. Pimenov, “Development of the hardness, three-point bending, and wear behavior of self-lubricating Cu–5Gr/Al₂O₃–Cr₃C₂ hybrid composites”, *Journal of Composite Materials*, vol. 57, no. 8, pp. 1395–1409, 2023. doi: 10.1177/0021998323112345.
- [28] Ü. Değirmenci, “Mechanical and tribological behavior of a hybrid WC and Al₂O₃ reinforced Al–4Gr composite”, *Materials Testing*, vol. 65, no. 9, pp. 1416–1436, 2023. doi: 10.1515/mt-2023-0213.
- [29] Ü.A. Usca, M. Uzun, M. Kuntoğlu, S. Şap, K. Giasin ve D.Y. Pimenov, “Tribological Aspects, Optimization and Analysis of Cu–B–CrC Composites Fabricated by Powder Metallurgy”, *Materials*, vol. 14, no. 15, Art. no. 4217, 2021. doi: 10.3390/ma14154217.