

EJONS

International Journal on Mathematic, Engineering and Natural Sciences

(Ulusal Fen, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Dergisi)

<https://ejons.org/index.php/ejons>

e-ISSN: 2602 - 4136

Araştırma Makalesi

Doi: <https://doi.org/10.5281/zenodo.11220772>

Cam Elyaf Takviyeli Kompozit Malzemelerin Alev Sprey Kaplama Yöntemi İle $Cr_2O_3 + TiO_2$ Kaplanması İçin Kaplama Özelliklerinin İncelenmesi

Abdulsamet GÖR¹, Osman ASİ^{2*}¹ Uşak Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Uşak.² Uşak Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Uşak.*Sorumlu Yazar e-mail: osman.asi@usak.edu.tr

Makale Tarihi

Geliş: 10.04.2024

Kabul: 15.05.2024

Anahtar Kelimeler

Elyaf takviyeli kompozit malzeme,
Alev sprej kaplama,
Mekaniksel özellikler ,

Öz: Bu çalışmada, cam elyaf takviyeli kompozit malzemelerin alev sprej kaplama yöntemi ile $Cr_2O_3 + TiO_2$ kaplanmasında kaplama özelliklerinin incelenmesi yapılmıştır. Kaplama yapılacak olan kompozit malzemelerin imalatında farklı elyaf yoğunluklarına sahip (200, 300 ve 500 g/m²) cam elyafli dokuma kumaşlar ve matris malzemesi olarak epoksi reçine kullanılmıştır. Kompozit malzemeler imatları el yatırma yöntemi ile yapılmıştır. Plaka şeklinde imatları yapılan kompozit malzemelere alev sprej kaplama yöntemi ile $Cr_2O_3 + TiO_2$ seramik tozların kaplama işlemleri yapılmıştır. Kaplama yapılan malzemelerin kaplama kalitesini incelemek için kaplama yapılan plakalardan standartlara uygun numuneler hazırlanarak mikroyapı incelemeleri, sertlik ölçümleri, yüzey pürüzlülüğü ölçümleri ve yapışma mukavemeti değerlerinin tespiti için deneyler yapılmıştır. Numunelerin mikroyapı incelemeleri optik mikroskop ve SEM mikroskopunda yapılmıştır. Kaplamaların porozite miktarlarının ölçümleri optik mikroskopta bulunan Clemex görüntü analiz programı ile yapılmıştır. Kaplamaların mikrosertlik değerleri, numuneler yüzeyinde, mikro sertlik ölçme cihazında ölçülmüştür. Numunelerin yapışma mukavemetleri ASTM C-63 standardına göre çekme deneyi cihazında belirlenmiştir. Kaplama yapılan kompozit malzemenin özelliklerinin kaplama kalitesini etkilediği belirlenmiştir. En yüksek yapışma mukavemeti değerleri en yüksek elyaf yoğunluğuna sahip olan cam elyaf takviyeli (500 gr/m²) kompozit malzeme üzerine yapılan kaplamada elde edilmiştir. Porozite miktarı yüksek olan kaplamaların sertlik değerleri ve yapışma mukavemeti değerleri düşük meydana gelmiştir.

Atf Kuyesi: Gör, A. ve Asi, O. (2024). Cam Elyaf Takviyeli Kompozit Malzemelerin Alev Sprej Kaplama Yöntemi İle $Cr_2O_3 + TiO_2$ Kaplanması İçin Kaplama Özelliklerinin İncelenmesi, International Journal on Mathematic, Engineering and Natural Sciences, 8(2):183-190.

How to cite: Gör, A. ve Asi, O. (2024) Investigation Of Coating Properties In $Cr_2O_3 + TiO_2$ Coatings Of Glass Fiber Reinforced Composite Materials By Flame Spray Coating Method, International Journal on Mathematic, Engineering and Natural Sciences, 8(2):183-190.

Investigation Of Coating Properties In $Cr_2O_3 + TiO_2$ Coatings Of Glass Fiber Reinforced Composite Materials By Flame Spray Coating Method

Article Info

Received: 10.04.2024

Accepted: 15.05.2024

Keywords

Fiber-reinforced composite materials,
Flame spray coating,
Mechanical properties,

In this study, the coating properties of glass fiber reinforced composite materials were examined in $Cr_2O_3 + TiO_2$ coating by flame spray coating method. In the manufacture of the composite materials to be coated, glass fiber woven fabrics with different fiber densities (200, 300 and 500 g/m²) and epoxy resin were used as matrix material. Composite materials were manufactured using the hand lay-up method. Coating processes of $Cr_2O_3 + TiO_2$ ceramic powders were performed on the composite materials manufactured in the form of plates using the flame spray coating method. In order to examine the coating quality of the coated materials, samples were prepared from the coated plates in accordance with the standards and experiments were carried out to determine microstructure examinations, hardness measurements, surface roughness measurements and adhesion strength values. Microstructural examinations of the samples were carried out under optical microscope and SEM microscope. Measurements of porosity amounts of the coatings were made with the Clemex image analysis program on the optical microscope. The microhardness values of the coatings were measured on the surface of the samples using a micro hardness measuring device. The adhesion strength of the samples was determined in the tensile test device according to ASTM C-63 standard. It has been determined that the properties of the coated composite material affect the coating quality. The highest adhesion strength values among the coated samples were obtained in the coating made on glass fiber reinforced (500 g/m²) composite material, which has the highest fiber density. Hardness values and adhesion strength values of coatings with high porosity amount were low.

1.Giriş

İmalat sektöründe kullanılan malzemeler içinde kullanım oranı çok hızlı bir şekilde artan malzemelerin başında kompozit malzemeler gelmektedir. Kompozit malzemeler özellikle çok iyi dayanım/yoğunluk oranlarından dolayı günümüz endüstrisinde çok yaygın olarak kullanılmaktadırlar (Bunsell vd., 2005; Chawla, 2019). Elyaf takviyeli polimer matrisli kompozit malzemelerin imalatında kullanılan elyafların malzemesi ve kullanım geometrisi imalatı yapılan kompozit malzemelerin özelliklerini etkilemektedir. Kompozit malzeme imalatı yapılırken elyafların yerleştirme açıları ve imatları sonucunda meydana gelen boşluklar kompozit malzemenin özelliklerini etkilemektedir (Atlıhan ve Ergene, 2018). Yüksek dayanım istenilen yerlerde karbon elyafının kullanılması daha çok tercih edilmektedir. Maliyetin önemli olduğu yerlerde ise cam elyafının kullanımı tercih edilmektedir. Elyaf takviyeli polimer matrisli kompozit malzemelerin genellikle mekaniksel özelliklerinin iyi olmasına rağmen bazı dezavantajlı özelliklere sahiptirler. Özellikle tribolojik davranışları düşüktür ve yüksek sıcaklıklarda kullanılamamaktadır (Visconti vd., 1992). Bu kompozitlerin tribolojik davranışlarını iyileştirmek ve yüksek sıcaklıklara maruz kaldıklarında zarar görmelerini engellemek için modern kaplama yöntemlerinden olan termal sprej kaplama yöntemleri uygulanabilmektedir (Thakur ve Vasudev, 2022; Pawlowski, 2008). Özellikle, rüzgar türbini, uçak kanatları, uzay araçları, telekomünikasyon gibi yerlerde kullanılan kompozit malzemelerde soğuk ortamlarda buzlanma meydana gelmemesi için termal sprej kaplama uygulamaları yapılmaktadır (Leopera-Valle ve McDonald, 2016). Yüksek sıcaklıklara dayanıklı ve aşınma dayanımı yüksek olan seramik tozları malzemelerin üzerine termal sprej kaplama yöntemleri ile kaplanabilmektedir. Kaplama yapılacak malzemenin özellikleri ve kaplama yapılacak olan seramik tozların özelliklerine göre farklı termal sprej kaplama yöntemleri kullanılmaktadır. Termal sprej kaplama yöntemleri olarak, alev sprej kaplama, plazma kaplama, HVOF kaplama yöntemleri ve ark kaplama yöntemleri yaygın olarak kullanılmaktadır (Thakur ve Vasudev, 2022).

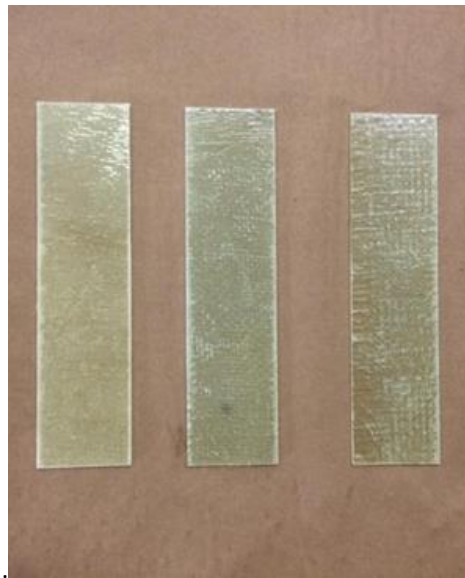
Termal sprej kaplama yöntemleri arasında alev sprej kaplama yönteminin diğer kaplama yöntemlerine göre bazı dezavantajları ve avantajları vardır. Alev sprej kaplama yöntemiyle elde edilen

kaplamalarda daha büyük tane boyutu, porozite miktarının fazlalığı ve çatlak uzunluğunun fazla olması dezavantajları arasındadır. Bunun yanında, ekonomik olması, hızlı uygulanması, kullanımının kolay olması, uygulama sıcaklığının düşük olması nedeniyle kaplama yapılacak malzemeye zarar vermemesi avantajları arasındadır (Pawłowski, 2008). Termal sprej kaplama işleminin başarılı bir şekilde gerçekleştirilebilmesi için kaplama işlemi yapılacak olan malzemenin, kaplama malzemesinin ve termal kaplama yönteminin ve uygulama parametrelerinin seçimi çok önemlidir. Metalik malzemeler uygulanan standart plazma sprej prosedürleri, cam elyaf ve karbon elyaf takviyeli polimer matrisli kompozit malzemelerin ısıya duyarlılıkları ve polimerik malzemelerin erimelerinden dolayı uygun değildir. Kaplama işlemi sırasında önlemler alınmazsa aşırı ısı kompozit malzemeye zarar verebilir (Leopera-Valle ve McDonald, 2015; Gonzalez vd., 2016).

Bu çalışmada; farklı elyaf yoğunluklarına sahip (200, 300 ve 500 g/m²) cam elyaf dokuma kumaşlar ve matris malzemesi olarak epoksi reçine kullanılarak imatları yapılmış olan kompozit malzemelerin alev sprej yöntemi kullanılarak Cr₂O₃ +TiO₂ sert seramik tozları ile kaplaması yapılmıştır. Kaplama yapılan malzemelerin kaplama kalitesini incelemek için mikroyapı incelemeleri, sertlik ölçümleri, yüzey pürüzlülüğü ölçümleri ve yapışma mukavemeti değerlerinin tespiti için deneyler yapılmıştır.

2. Materyal ve Yöntem

Bu çalışmada, kaplama yapılacak olan kompozit malzemelerin imalatında farklı elyaf yoğunluklarına sahip (200, 300 ve 500 g/m²) cam elyaf dokuma kumaşlar ve matris malzemesi olarak epoksi reçine kullanılmıştır. Üç farklı kompozit malzemenin üretimi yapılmıştır. Kompozit malzemeler el yatırma yöntemi ile 50x50 cm ölçülerinde ve 3 mm kalınlığında plaka şeklinde imatları yapılmıştır. İmatları yapılan kompozit malzemelerden 5x20 cm ölçülerinde numuneler kesilerek (Şekil 1) kumlama işlemine tabi tutulmuşlardır. Numunelere kumlama işleminden sonra Al astar kaplama işlemi uygulanmıştır. Bu işlem kaplama yapılacak altlık malzemeye astar etkisi yaparak daha iyi tutunma yüzeyi oluşturmaktadır. Alev sprej kaplama yöntemi kullanılarak, kompozit malzemelerin yüzeyine Cr₂O₃+TiO₂ seramik tozunun kaplama işlemi yapılmıştır. Bu malzeme sert, aşınmaya dayanıklı ve kimyasal olarak inert bir yüzeye ihtiyaç duyulan uygulamalarda tercih edilmektedir. Seramik tozun bileşiminde TiO₂ olması, saf krom oksit malzemelerle karşılaştırıldığında daha yoğun, püskürtüldüğünde yüzey pürüzlülüğü daha düzgün ve daha yüksek tokluğa sahip kaplamalar olmasını sağlamaktadır. Kaplama işlemi METSER Kaplama Makine Bakım Onarım Sanayi Tic. Ltd. Şirketi imalathanesinde yapılmıştır. Numunelere uygulanan alev sprej kaplama parametreleri Tablo 1'de verilmiştir.

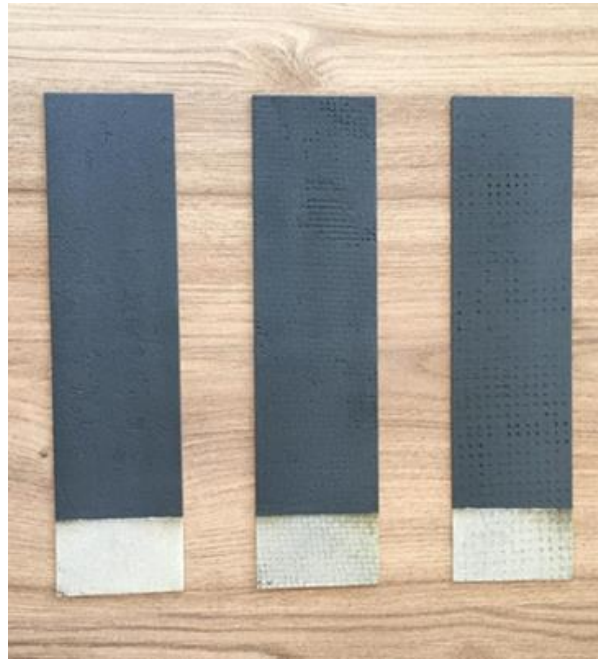


Şekil 1: İmatları yapılan ve kaplama işlemi yapılacak olan kompozit malzemeler

Tablo 1: Alev Sprey Kaplama İşlemi Parametreleri

Püskürtme Başlığı	Metco Thermo Spray 5P
Püskürtme mesafesi	10-12 cm
Püskürtme Oranı	2g/sn
Oksijen Basıncı	15 Psi
Asetilen Basıncı	15 Psi
Uygulama Sıcaklığı	1500-2000 °C

Alev sprej yöntemi ile kompozit malzemelerin yüzeyine seramik tozlarının kaplama işlemleri başarılı bir şekilde uygulanmıştır. Kaplama işlemleri sonucunda kaplama yapılan kompozit malzemelerde herhangi bir deformasyon meydana gelmediği gözlemlenmiştir. Aşağıdaki Şekil 2’de kompozit malzemelerin kaplama işlemleri sonucundaki görüntüleri verilmiştir.

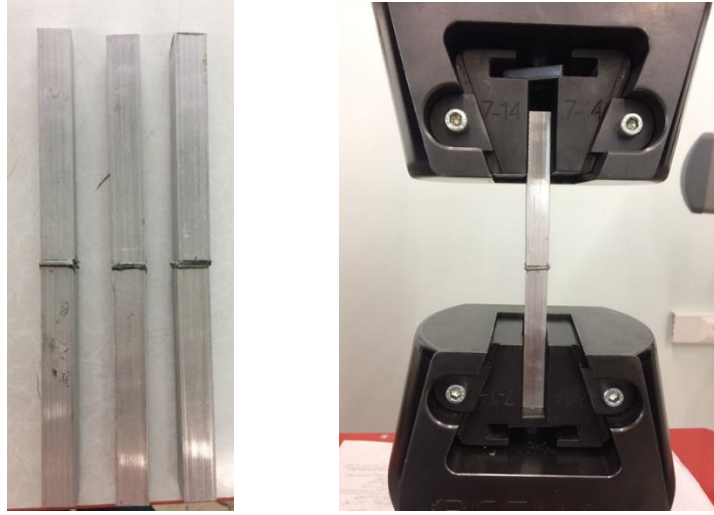


Şekil 2: Kompozit malzemelerin kaplama işlemi sonucu görünüşleri

Kaplama yapılan numunelerin mikroyapı incelemeleri, yüzey pürüzlülüklerinin, sertlik değerlerinin belirlenmesi ve yapışma mukavemetlerinin tespiti için hassas kesme cihazında numuneler elde edilmiştir. Numunelerin bir bölümü bakalite alınmış ve zımparalama-parlatma cihazında yüzeyleri parlatılmıştır. Numunelerin mikroyapı incelemeleri optik mikroskop ve SEM mikroskobunda yapılmıştır. Kaplamaların porozite miktarlarının ölçümleri Nikon marka optik mikroskopta bulunan CLEMEX görüntü analiz programı ile yapılmıştır. Kaplamaların mikrosertlik değerleri, bakalite alınmış numuneler yüzeyinde, Shimadzu HMV-2 marka mikro sertlik ölçme cihazında ölçülmüştür. Sertlik değerleri kaplama yüzeyinin farklı noktalarında yapılan 5 farklı ölçümün ortalaması olarak belirlenmiştir. Kaplamaların yüzey pürüzlülük değerlerinin ölçümü TR 200 el tipi pürüzlülük ölçüm cihazı ile yapılmıştır. Yüzey pürüzlülük değerleri kaplama yüzeyinin farklı noktalarında yapılan 3 farklı ölçümün ortalaması olarak belirlenmiştir.

Kaplama yapılan kompozit malzeme numunelerin yapışma mukavemetleri ASTM C-63 standardına göre çekme deneyi cihazında belirlenmiştir. Kaplama yapılmış numunelerden hassas kesme cihazında 1.5x1.5 cm ölçülerinde kesilerek numuneler hazırlanmıştır. Bu numuneleri üzerine yapıştırıp çekme deneyine tabi tutmak için 1.5x1.5x10 cm ölçülerinde test kuponları hazırlanmış, numuneler kuponların üzerine yapıştırıcı ile yapıştırılmıştır. Numunelerin her iki yüzeylerine de ince bir film şeklinde homojen olarak yapıştırıcı sürülüp 2 tane test kuponu arasına eksenleri çakışacak şekilde

yerleştirilmiştir. Daha sonra bu düzenek iyice yapışması ve ara yüzeyde bir dolgu malzemesi oluşabilmesi için 24 saat boyunca bekletilmiştir. Şekil 3 (a)'da çekme deneyi için hazırlanmış test kuponları Şekil 3 (b)'de ise çekme cihazına yerleştirilmiş numuneler görülmektedir. Numunelerin çekme deneyinde elde edilen maksimum kuvvet değerleri kaplama alanlarına bölünerek yapışma mukavemeti değerleri tespit edilmiştir. Her bir grup için 3 adet deney yapılarak ortalama değerleri alınmıştır.



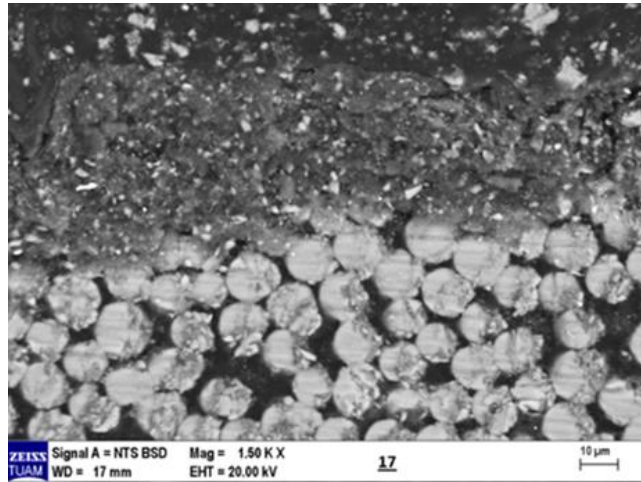
(a)

(b)

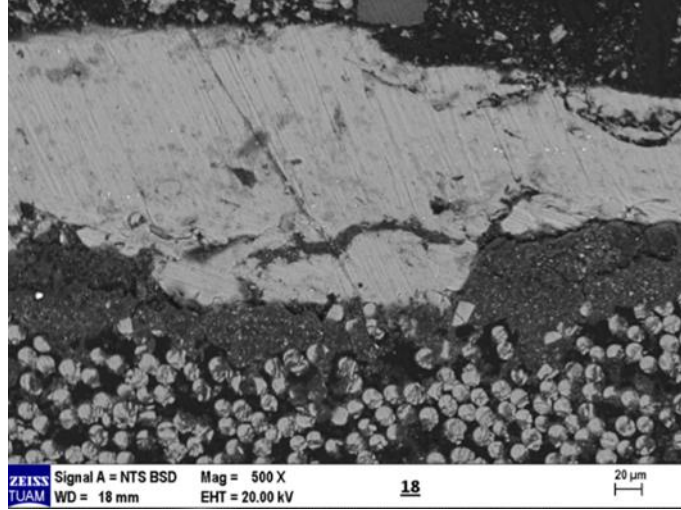
Şekil 3: Numunelerin çekme deneyleri (a: çekme deneyi için hazırlanmış test kuponları, b: çekme cihazına yerleştirilmiş numuneler.)

3. Bulgular ve Tartışma

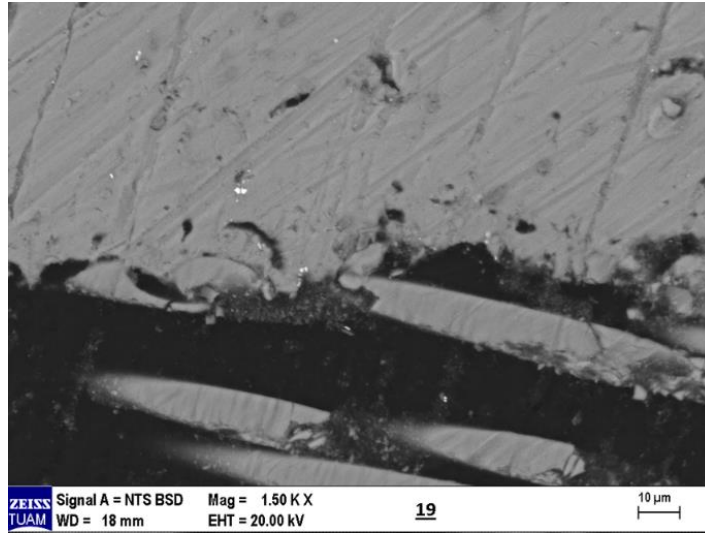
Cam elyaf takviyeli epoksi matrisli kompozit malzemelere alev sprej kaplama yöntemi ile kaplama işlemleri sonucunda, kaplamaların mikroyapı analizleri için numuneler kesilip bakalite alma işlemleri, yüzey zımparalama ve parlatma işlemleri sonucunda SEM mikroskobunda ve optik mikroskopta incelemeleri yapılmıştır. Aşağıdaki Şekil 4-6'de kaplamaların SEM görüntüleri verilmiştir.



Şekil 4: Cam elyaf takviyeli (200 gr/m²) kompozit malzemede kaplamanın SEM görüntüsü



Şekil 5: Cam elyaf takviyeli (300 gr/m²) kompozit malzemede kaplamanın SEM görüntüsü



Şekil 6: Cam elyaf takviyeli (500 gr/m²) kompozit malzemede kaplamanın SEM görüntüsü

Numunelerin SEM mikroskobunda çeşitli büyütmelerde görüntüleri çekilmiş, kaplama yüzeyleri incelenmiştir. Alev sprej kaplamaların karakteristik özellikleri poroziteli olmalarıdır. Porozite, kaplamanın sertlik, aşınma direnci ve yapışma mukavemetini azalttığı için istenmeyen bir özelliktir. Porozite miktarı ergitme gücünün artırılması, sprej mesafesinin kısaltılması gibi parametre kontrolleriyle en aza indirilmeye çalışılır (Bradaia vd., 2008). Ancak yapılan çalışmada altlık malzeme olarak kompozit malzeme kullanılması, elyafların ve epoksi matrisin çok yüksek ısılarda bozulmaları nedeniyle sprej mesafesinin uzun tutulması kaplamanın poroziteli bir yapıya sahip olmasına neden olmuştur. Şekil 4'de cam elyaf takviyeli (200 gr/m²) kompozit malzeme üzerine kaplanmış numunenin yapısındaki poroziteler ve ergimemiş partiküller görülmektedir. Ayrıca numunelerin kaplama kalınlığının tüm yüzey boyunca sabit bir kalınlıkta olmadığı tespit edilmiştir. Bunun nedeni kumlama işlemine tabi tutulan altlık malzemenin yüzeyinde oluşan girinti-çıkıntılardır.

Deney sonuçlarına göre numuneye astar kaplama yapılmasının kaplama-altlık malzeme arasında iç gerilmelerden doğan uyumsuzluğu engellediği, bu yüzden kaplama ile altlık malzeme arasında ara yüzey kusurlarının çok düşük meydana geldiği gözlemlenmiştir. Kaplama yapılan cam elyaf takviyeli kompozit malzemelerin deneyler sonucunda elde edilen sertlik, porozite, yüzey pürüzlülüğü ve yapışma mukavemeti değerleri toplu olarak aşağıdaki Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2: Kaplama yapılan kompozit malzemelerin kaplama özellikleri

Kaplama Grup No	Kaplama Malzemesi	Kompozit Malzemede Kullanılan Elyaf Türü	Kaplama Sertlik Değeri (HV)	Porozite %	Yüzey Pürüzlülüğü Ra (μm)	Kaplama Yapışma Mukavemeti (MPa)
1	$\text{Cr}_2\text{O}_3+\text{TiO}_2$	Cam elyafı (200 g/m ²)	612	19	2.846	8,4
2	$\text{Cr}_2\text{O}_3+\text{TiO}_2$	Cam elyafı (300 g/m ²)	743	11	2.128	12,6
3	$\text{Cr}_2\text{O}_3+\text{TiO}_2$	Cam elyafı (500 g/m ²)	765	10	2.116	15,2

Kaplama yapılmış olan kompozit malzemelerin kaplama yüzey sertlikleri Shimadzu HMV-2 marka mikro sertlik ölçme cihazında belirlenmiştir. Sertlik değerleri yüzeyin farklı noktalarında yapılan 5 farklı ölçümün ortalaması alınarak belirlenmiştir. Numunelerin sertlik değerleri Tablo 2 te verilmiştir. Tablodaki verilere göre, kaplamalarda elde edilen en yüksek sertlik değerleri en yüksek cam elyaf yoğunluğuna sahip olan cam elyaf takviyeli (500 gr/m²) kompozit malzeme üzerine yapılan kaplamada elde edilmiştir. Kaplama numuneleri arasında en düşük sertlik değerleri ise porozite miktarının en yüksek olduğu (200 gr/m²) kaplama numunesinde meydana gelmiştir. Cam elyaf takviyeli kompozit malzemeler arasında kompozit malzeme imalatında kullanılan cam elyaf yoğunluğunun artmasıyla kaplama yapılan malzemelerde sertlik değerlerinin yükseldiği belirlenmiştir.

Optik mikroskopta yapılan incelemeler sonucunda en yüksek porozite miktarı en düşük elyaf yoğunluğuna sahip olan cam elyaf takviyeli (200 gr/m²) kompozit malzeme üzerine yapılan kaplamada elde edilmiştir. Cam elyaf takviyeli kompozit malzemeler arasında kompozit malzeme imalatında kullanılan cam elyaf yoğunluğunun artmasıyla kaplama yapılan malzemelerde porozite değerlerinin azaldığı belirlenmiştir.

Yüzey pürüzlülük cihazında yapılan ölçümler sonucunda kaplama yüzeylerinde ölçülen en yüksek yüzey pürüzlülük miktarı, en düşük elyaf yoğunluğuna sahip cam elyaf takviyeli (200 gr/m²) kompozit malzeme üzerine yapılan kaplamada elde edilmiştir. Cam elyaf takviyeli kompozit malzemeler arasında, kompozit malzeme imalatında kullanılan cam elyaf yoğunluğunun artmasıyla kaplama yapılan malzemelerde yüzey pürüzlülüğü değerlerinin azaldığı belirlenmiştir.

Çekme deneyi cihazında yapılan yapışma mukavemeti deneyleri sonucunda, kaplama yapılan numuneler arasında en yüksek yapışma mukavemeti değerleri en yüksek elyaf yoğunluğuna sahip olan cam elyaf takviyeli (500 gr/m²) kompozit malzeme üzerine yapılan kaplamada elde edilmiştir. Cam elyaf takviyeli kompozit malzemeler arasında kompozit malzeme imalatında kullanılan cam elyaf yoğunluğunun artmasıyla kaplama yapılan malzemelerde yapışma mukavemeti değerlerinin arttığı belirlenmiştir.

Alev sprey kaplama yöntemiyle kaplanmış seramik kaplamaların mikroyapıları kaplamaların mekaniksel özelliklerini önemli derecede etkilemektedir. Mikroyapıda meydana gelen porozite, mikro çatlaklar ve ara yüzey kusurları kaplamaların mekaniksel özelliklerini olumsuz olarak etkilemektedir (Bradaia vd., 2008). Kaplama yapılan kompozit malzemelerin imalatı esnasında elyafların yerleştirme açıları, oranı ve imatları sonucunda mikroyapıda meydana gelen hatalar da kaplama kalitesini etkileyen faktörler olabilmektedir (Chawla, 2019).

4.Sonuç

Farklı elyaf yoğunluğuna sahip cam elyaf takviyeli epoksi matrisli kompozit malzemelere alev sprej kaplama yöntemi kullanılarak $Cr_2O_3 + TiO_2$ kaplanması sonucunda yapılan deneysel çalışmalar sonucunda aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

*Alev sprej kaplama yöntemi kullanılarak $Cr_2O_3 + TiO_2$ sert seramik tozları cam elyaf takviyeli epoksi matrisli kompozit malzemeler üzerine başarılı bir şekilde kaplanabilmektedir.

*Kaplama yapılan kompozit malzemenin imalatında kullanılan elyaf yoğunluğu kaplama işlemleri sonucunda kaplamalarda meydana gelen sertlik, porozite, yüzey pürüzlülüğü ve yapışma mukavemeti değerlerini etkilemektedir.

* Kaplamalarda elde edilen en yüksek yapışma mukavemeti ve sertlik değerleri en yüksek cam elyaf yoğunluğuna sahip olan cam elyaf takviyeli (500 gr/m^2) kompozit malzeme üzerine yapılan kaplamada elde edilmiştir. 500 gr/m^2 elyaf yoğunluğuna sahip olan kompozit malzemenin kaplamasının yapışma mukavemeti değeri, 200 gr/m^2 elyaf yoğunluğuna sahip olan kompozit malzemenin kaplamasının yapışma mukavemeti değerine göre % 81 daha yüksektir.

•Porozite miktarı yüksek olan kaplamaların sertlik değerleri ve yapışma mukavemeti değerleri düşük meydana gelmiştir.

Kaynaklar

- Atlıhan, G. & Ergene, B. (2018). Vibration analysis of layered composite beam with variable section in terms of delamination and orientation angle in analytical and numerical methods. *Acta Physica Polonica A*. 134(1), 13-17.
- Bradaia, M.A., Bounarb, N., Benabbasb, A. & Ati, A. (2008). Study of microstructure, phases and microhardness of metallic coatings deposited by flame thermal spray, *Journal of materials Processing Technology* 200, 410–415.
- Bunsell, A.R., Joannès, S. & Thionnet A. (2005). *Fundamentals of Fibre Reinforced Composite Materials*, Oxon, CRC Press.
- Chawla, K.K. (2019). *Composite Materials: Science and Engineering*, Fourth Edition, Springer, SwitzerlandAG, 139-197.
- Gonzalez, R., Ashrafizadeh, H., Lopera, A., Mertiny P. & McDonald A. (2016). A Review of Thermal Spray Metallization of Polymer-Based Structures, *Journal of Thermal Spray Technology*, 25(5), 897.
- Lopera-Valle A. & McDonald A., (2015). Application of Flame-Sprayed Coatings as Heating Elements for Polymer-Based Composite Structures, *Journal of Thermal Spray Technology*, 24(7), 1289.
- Lopera-Valle A. & McDonald A. (2016). Flame-sprayed coatings as de-icing elements for fiber-reinforced polymer composite structures: Modeling and experimentation, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 97, 56–65.
- Pawlowski, L. (2008). *The Science and Engineering of Thermal Spray Coatings*, Second Edition, John Wiley & Sons Ltd, England, 67-74.
- Thakur, L. & Vasudev, H. (2022). *Thermal Spray Coatings*, Oxon, CRC Press, 1-37.
- Visconti, I.C., Paesano, A. & Penasa, M., (1992). An investigation of antiwear coatings on fibre-reinforced plastics, *Composites Manufacturing*, Vol. 3, No.1, 14-19.