

## Kutu Sementasyon Yöntemi ile Ti6Al4V Alaşımı Üzerine Aluminid Esaslı Kaplama Üretimi

Ferhat YILMAZ<sup>1</sup> , Gözde Celebi EFE<sup>2</sup> , Tuba YENER<sup>3\*</sup> 

<sup>1</sup> Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Sakarya, Türkiye.  
ferhat.yilmaz4@ogr.sakarya.edu.tr

<sup>2</sup> Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Sakarya, Türkiye. gcelebi@subu.edu.tr

<sup>3</sup> Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Sakarya, Türkiye.  
tcerezci@sakarya.edu.tr

### ÖZ

Ti6Al4V alaşımları havacılık ve uzay alanında en çok kullanılan  $\alpha+\beta$  alaşımlarından biridir. Bu çalışmada yüzeyde Ti alüminid esaslı tabakası oluşturularak yüzey özelliklerinin iyileştirilmesi hedeflenmiştir. Üretilen kaplamanın karakteristik özellikleri taramalı elektron mikroskobu (SEM), enerji dağılımlı spektrometre (EDS) ve X-ışını kırınımı (XRD) vasıtasıyla incelenmiştir. Alüminyum kaynağı olarak Al, dolgu malzemesi olarak  $Al_2O_3$  tozu ve aktivatör olarak da  $NH_4Cl$  tozları açık atmosferli bir fırında  $700^\circ C$  sıcaklıkta 4,6 ve 8 saat alüminyum kaplama işlemi gerçekleştirilmiştir. Yapılan X-ışını (XRD) analizlerinde kaplama tabakası üzerinde TiAl,  $TiAl_2$  ve  $TiAl_3$  ve eser miktarda  $Al_2O_3$  fazları tespit edilmiştir. Kaplama tabakası kalınlığı tutma sürelerine bağlı olarak 12-20  $\mu m$  arasında değiştiği görülmüştür. Oluşan titanyum alüminid tabakasında 578-650 HV arasında sertlik değerleri elde edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Ti6Al4V alaşımı, kutu sementasyonu, alüminid esaslı kaplama

## Production of Aluminide Based Coating on Ti6Al4V Alloy by Pack Cementation Method

### ABSTRACT

Ti6Al4V alloy is one of the  $\alpha+\beta$  titanium alloys frequently used in aerospace and biomedical fields. In this study it is aimed to increase surface properties thanks to the aluminum-based protective and relatively harder intermetallic formed on the surface. The characteristic properties of this coating were investigated by scanning electron microscopy (SEM), energy dispersive spectrometry (EDS) and X-ray diffraction analyses (XRD). Al powder is used for aluminum source,  $Al_2O_3$  powder as the filler material and  $NH_4Cl$  powder used as the activator. Aluminization process was carried out in an open atmosphere furnace at  $700^\circ C$  for 4,6 and 8 hours. In the X-ray diffraction (XRD) analyzes, TiAl,  $TiAl_2$  and  $TiAl_3$  and  $Al_2O_3$  phases were detected on the coating layer. It has been observed that the coating layer thickness varies between 12-20  $\mu m$  depending on the holding times. The hardness of titanium aluminide layer was measured with the Vickers hardness method and the hardness values were between 578-650 HV.

**Keywords:** Ti6Al4V alloy, pack cementation, diffusion coating, aluminide-based coating

\* Corresponding Author's email: [tcerezci@sakarya.edu.tr](mailto:tcerezci@sakarya.edu.tr)

## 1 Giriş

Titanyum bazlı alaşımlar, sertlik, yüksek mukavemet ve üstün korozyon dirençleri nedeniyle havacılık, otomobil ve savunma sanayi endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Titanyum alaşımlarından yaygın olarak kullanılan  $\alpha+\beta$  alaşımlarından olan Ti6Al4V, iyi bir mekanik mukavemete ve şekillendirilebilirliğe sahiptir. Ti6Al4V titanyum alaşımı, 400°C üzerindeki yüksek çalışma sıcaklıklarına çıktığı zaman ise yüzeyinde oluşan  $TiO_2$  tabakası büyür ve parçalanır. Mekanik özelliklerinin bozulmasına yol açan bu durumu engellemek önem taşır. Oksidasyon direncini arttırmak ve yüksek servis sıcaklıklarında çalışmasında stabile etmek amacıyla Ti6Al4V alaşımı yüzey modifikasyonuna ihtiyaç duyulmaktadır [1]. Uygulanan modifikasyon işlemlerinden biri olan kutu sementasyonu, yapılan araştırmalar sonucu galvanizleme gibi diğer yüzey işlemlerine göre daha az maliyetli olduğu için üzerine yoğunlaşılacak alanların başındadır. Kutu sementasyon yöntemi, alaşımlı çeliklere aşınma ve korozyon direnci, sürtünme, oksidasyon gibi yüzey özelliklerini iyileştirme yanı sıra sert ve koruyucu alüminid kaplamalar oluşturmak için alternatif bir tekniktir [2].

Alaşımlı çelikler, titanyum alaşımları ve nikel alaşımları gibi üzerine sert ve koruyucu Al ve Cr içerikli kaplamalar korozyon direncinin iyileştirilmesinde önemli bir rol oynar. Yüksek sıcaklıklarda çelik malzemelerin yüzeyinde oluşan  $Fe_2O_3$  tabakasına göre Alümina ( $Al_2O_3$ ) gibi koruyucu bir oksit oluşumu alüminyum kaplama prosesi ile sağlanabilmektedir. Bu yolla daha stabil bir oksit tabakası oluşumu sayesinde korozyon direnci sağlanır. Altlık malzemesinin yüzeyine oksijenin difüzyonunu engellemek için  $Al_2O_3$ ,  $Cr_2O_3$ ,  $SiO_2$ , gibi ince oksit filmleri oluşturarak atmosferden yüzeyi korur [3]. Ancak, krom oksit ( $Cr_2O_3$ ) tabakası 900°C üzerine çıktığı zaman, farklı ortamlara göre 800 °C – 850 °C sıcaklıklara göre değişiklik gösterebilir, bu tabaka  $CrO_3$  tabakasına dönüşür ve daha fazla oksitlenme nedeniyle krom ölçüğü yetersiz hale gelir, altlık malzemesinin oksidasyon direncinde azalma meydana gelir. Alüminyum dioksit ( $Al_2O_3$ ) ve silisyum dioksit ( $SiO_2$ ) tabakası, krom oksit ( $CrO_3$ ) tabakasına göre daha yüksek sıcaklıklara dayanır ve bu da oksidasyona karşı yüksek sıcaklıklarda direnci gösterir [4]. Dolayısıyla yüzeyde alüminid tabakası oluşturmak suretiyle yüksek sıcaklıklarda alümina oluşumuna izin verilir ve bu yolla altlık malzeme oksidasyona karşı direnç sağlar [5]–[7].

Alüminid kaplamaların temel özellikleri şunlardır: İstenilen servis koşullarında (korozyon, erozyon ve strese bağlı korozyon sorunları vb.) kaplama- altlık ara yüzünün bütünlüğünü (ideal bir ara yüzey, sürekli ve gerilmelerinden arınmış yapı) sağlamak. Kaplamanın mekanik ve termal çevrimler altında alt tabakaya yapışması [8].

Bu çalışma literatürden farklı olarak, Ti6Al4V alaşımının açık atmosferli bir ortamda, nispeten düşük bir sıcaklık ve kısa işlem sürelerinde alüminid birikimi sağlanmış olup oluşan Ti esaslı alüminid fazlar mikroyapısal ve sertlik yönüyle karakterize edilmiştir.

## 2 Metodoloji

Çalışmada kullanılan Ti6Al4V alaşımı ve kimyasal kompozisyon değerleri Türk Havacılık ve Uzay Sanayii AŞ'den temin edilmiştir. Tablo 2.1'de kimyasal kompozisyonu verilmiştir. Ti6Al4V titanyum alaşımı abrasiv diskli kesme cihazında 30 x 2 x 19,5 .mm uzunluğunda kesilmiş ve deney numunelerinin bütün yüzeyleri 60, 120, 240, 400, 600, 800 ve 1000 grit zımpara ile zımparalanmıştır. Sonrasında alkol ile temizlenip, kurutulmuştur. Böylece alüminyumlama işlemi öncesi Ti6Al4V alaşımının yüzeylerinin oksit, kir ve yağlardan arındırılması sağlanmış ve kaplama işlemi sırasında alüminyumun yüzeye daha

iyi yapışmasını sağlamak amaçlanmıştır.

**Tablo 2.1.** Ti6Al4V kimyasal kompozisyonu [9]

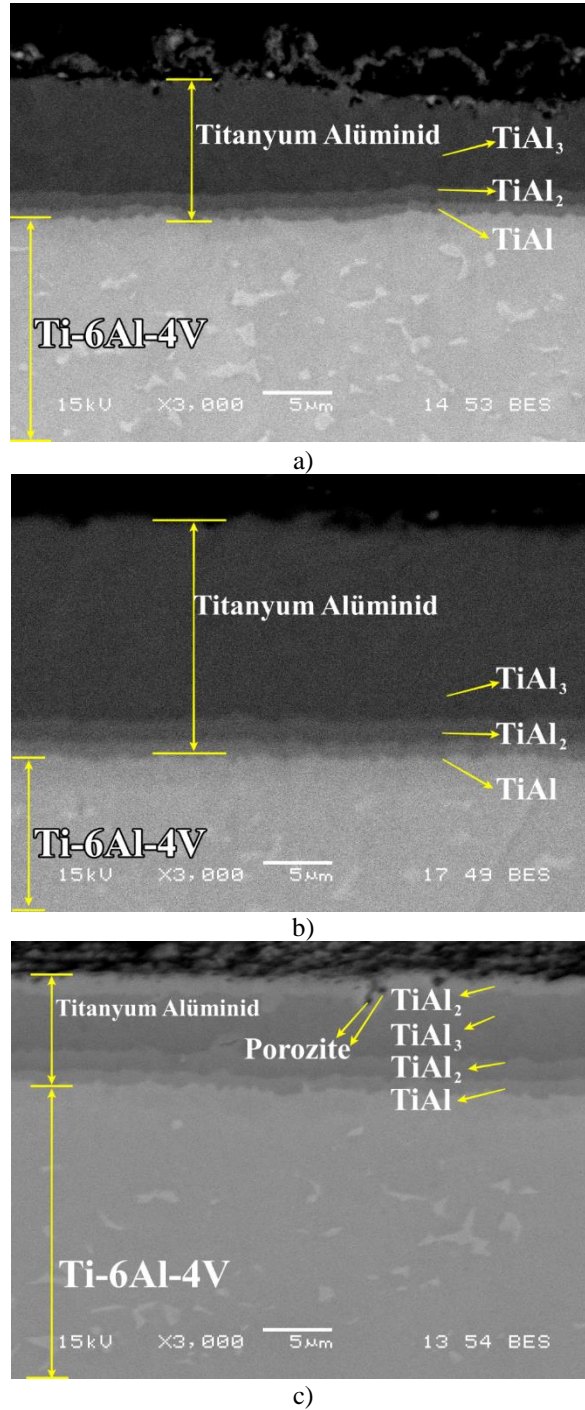
N	Fe	V	Al	Ti
0.005	0.165	3.93	5.89	Denge

Kutu sementasyonu yöntemi ile Ti6Al4V alaşımının yüzeyinde alüminid kaplama tabakası oluşturmak için, aktivatör olarak %10 NH<sub>4</sub>Cl, kaplama tozu olarak %35 saf Al (Alfa aeaser) tozu ve %55 ticari saf Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> tozu hassas terazi yardımıyla istenilen ağırlıkça oranda tartılmıştır. Tartım sonrası tozlar homojen bir şekilde karıştırılmıştır. Karışım tozları alaşımın içinde bulunduğu, çelik bir pota içerisinde 700° 4, 6 ve 8 saat açık atmosferik bir fırında işleme tabi tutulmuştur. Kaplama sonrası oda sıcaklığına kadar soğutulmuş ve fırından alınmıştır. Alüminyum kaplama işleminden sonra yüzeyi kaplanmış numunelerin kesitleri mikroyapı çalışmaları için metalografik olarak hazırlanmıştır.

Kutu sementasyonu yöntemi ile alüminyumla işlemi uygulanmış numunelerin mikroyapı incelemesi JOEL JSM-5600 model taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile yapılmıştır. Kaplama yüzeyinde oluşan fazların tespiti için 20° ile 90° arasında , 1.54056 Å dalgı boyuna ve 2θ açısında CuKα radyasyonu kullanılarak Rigaku X-ışını difraktometresi ile belirlenmiştir. Titanyum alüminid tabakalarının sertlikleri mikro sertlik ölçümleri Leica WMHT-Mod sertlik cihazında Vickers elmas piramit uç kullanılarak 15 saniye süre ile oluşturulan iz yardımı ile belirlenmiştir.

### 3 Bulgular ve Tartışma

Şekil 3.1.'de 700°C sıcaklıkta 4, 6 ve 8 saat alüminyumlama işlemine tabi tutulmuş Ti6Al4V alaşımının SEM kesit görüntüsü verilmiştir. Kesit görüntülerinde üç adet belirgin intermetalik tabaka bulunmaktadır. Bu tabakalar Şekil 3.4'de alınan SEM-EDS analize göre TiAl<sub>3</sub>, TiAl<sub>2</sub> ve TiAl olarak belirlenmiştir. XRD analizleri de bu sonucu destekler niteliktedir (Şekil3.3.). SEM mikro yapılarına bakıldığında; 4 saat işlem görmüş numunede birikme az miktarda gerçekleşmiş olup tabaka kalınlığı yaklaşık 14 µm olarak tespit edilmiştir. Kaplama süresi 6 saat'e ulaşıldığında ise numune yüzeyinde daha fazla alüminid tabakası birikimi (~18 µm) ve homojen bir kaplama tabakası elde edilmiştir. Kaplama süresinin artışına bağlı olarak 8 saat sonunda ise numunenin yüzeyinde oksit oluşumu başlamıştır. Bununla beraber ortamdaki alüminyumun oksit oluşumuna harcanması sebebiyle kaplama tabakasında beklenen artış sağlanamamış olup yaklaşık kalınlık 4 saat ile aynı değere ulaşmıştır (~13 µm). Optimum homojenlikte ve sürekli bir alüminyumca zengin kaplama tabakası ise 6 saat kaplanmış numune yüzeyinde görülmüştür.



Şekil 3.1. 700°C sıcaklıkta a) 4 b) 6 c) 8 saat alüminyumlanmış Ti6Al4V alaşımı SEM görüntüsü

Kutu sementasyon yöntemiyle alüminyum kaplama işleminde başlangıçta Al atomları aktivatörden gelen Cl gazı yardımıyla buhar fazına geçer ve  $AlCl_3$  gazı, altlık malzemesi yüzeyine yayılır ve atomik olarak oluşan Al, Ti alaşımı ile reaksiyona girer. Şekil 3.2.'de kutu sementasyonun şematik gösterimi verilmiştir.

Aktivatör olarak kullanılan  $NH_4Cl$ , ilk olarak reaksiyon (1)'de gösterildiği gibi 400°C [5] üzeri sıcaklıklara çıktıkça  $NH_3$  ve  $HCl$ 'ye ayrışır:



HCl, Al tozu ile reaksiyona girer ve  $\text{AlCl}_3$  buhar fazına geçer:



Gaz halindeki  $\text{AlCl}_3$  numune yüzeyine taşınır yüksek sıcaklıklara çıktığında Ti alaşımı altlık malzemesinden gelen titanyum, alüminyum ile reaksiyona girer ve AlTi tabakası oluşur.



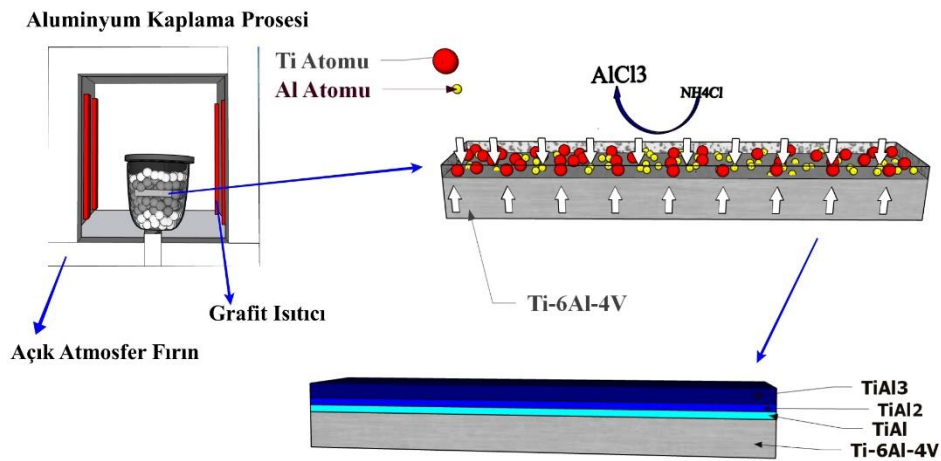
Aluminyum kaplama süresi arttıkça Al aktivitesi artar ve oluşan AlTi tabakasından gelen titanyum dışarı doğru difüze olarak aşağıdaki reaksiyonun gerçekleşmesini sağlar:



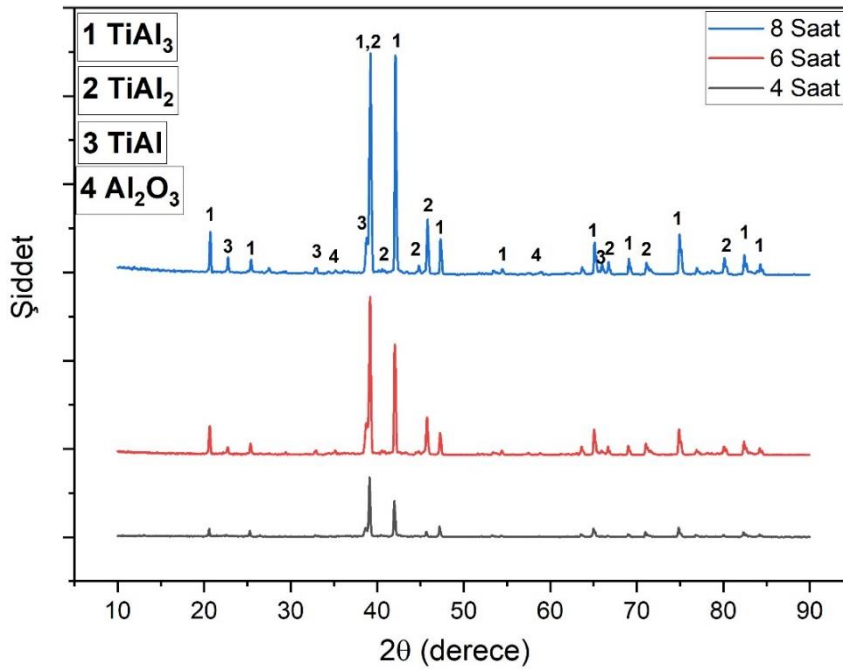
Yukarıdaki reaksiyon sonucu ortada  $\text{TiAl}_2$  tabakası gelişir. Aluminyumun aktivitesi daha da artması ve altlık malzemeden gelen titanyumun difüzyonu yavaşladığında aşağıdaki reaksiyon meydana gelir:



En dış tabakada  $\text{TiAl}_3$  tabakası oluşur. Bu kısımdan sonra altlık malzemesi üzerinde üç katmanlı bir kaplama tabakası oluşmaktadır [10].



Şekil 3.2. Kutu Sementasyonunda Gerçekleşen Reaksiyonların Şematik Gösterimi

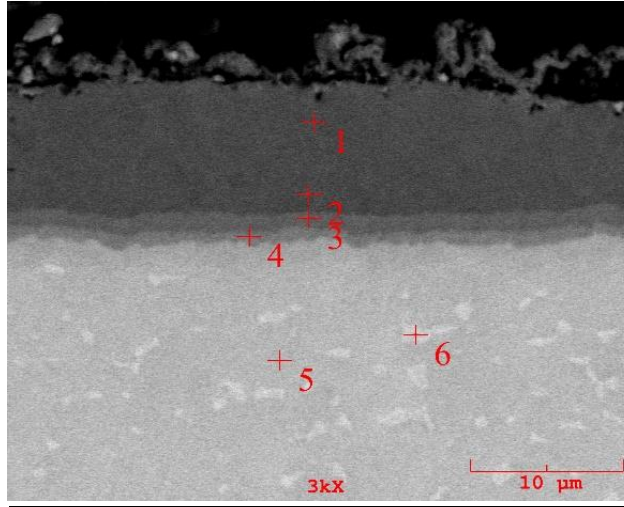


**Şekil 3.3.** 700°C sıcaklıkta 4, 6 ve 8 saat alüminyum kaplanmış Ti6Al4V alaşımının XRD analizi

Yang ve arkadaşlarının [1], Ti6Al4V titanyum alaşımını 400°C–800°C sıcaklıkta kutu sementasyonu yöntemiyle yaptığı alüminyum kaplama işleminde, benzer olarak 700°C sıcaklıkta 6 saat alüminyumla işlemi sonrasında XRD analizinde TiAl<sub>3</sub> fazının varlığına rastlanmıştır. Kaplama tabakasının üst kısmında TiAl<sub>3</sub> birikimi sağlanmıştır.

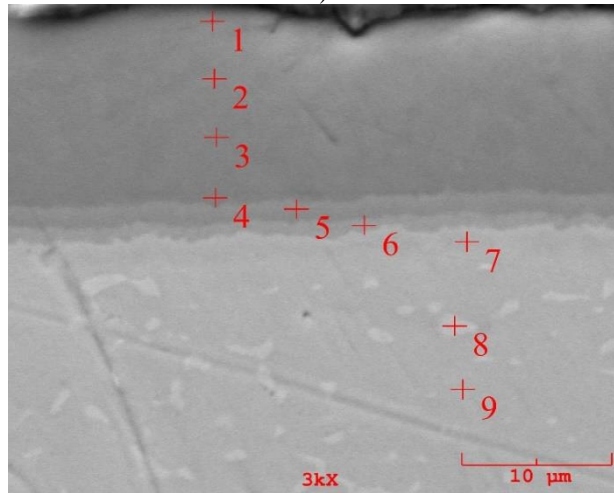
Şekil 3.4.'de Ti6Al4V alaşımının 700° C sıcaklıkta 4, 6 ve 8 saat alüminyumlanmış numunelerin SEM-EDS analizleri yer almaktadır. Sonuçlara baktığımızda sürenin artmasıyla beraber başlangıçta kaplama tabakasının kalınlığı ve daha sonra tabakanın kalınlığı düştüğü görülmektedir. Tabaka kalınlığı en fazla 18 µm ile 6 saat alüminyumlanmış numunede görülmektedir. Kaplama tabakalarının mikro yapı açısından incelendiğinde titanyum alüminid tabakası üç katman şeklinde olduğu görülmektedir. Üst kısımlarda alüminyumca zengin TiAl<sub>3</sub> tabakası oluşurken, yüzeyden aşağıya doğru TiAl<sub>2</sub> ve kaplamanın altlık malzemesi ile temas ettiği bölgede ise TiAl fazı oluşmuştur. Şekil 3.4.'de 1 numara ile gösterilen noktalarda 4 saat alüminyumlanmış numunede ağırlıkça %68,388 Al, 6 saat işlem görmüş numunede ağırlıkça %68,616 Al ve 8 saat de ise ağırlıkça %61,288 Al oranı görülmektedir. Burada görülen alüminyum oranının azalmasının, alüminyumun oksijenle reaksiyona girmesi ve TiAl<sub>3</sub> fazının TiAl<sub>2</sub> fazına dönüşmesi olarak yorumlanabilir. Şekil 3.5.'de yer alan Ti-Al denge diyagramına bakıldığında stokiometrik olarak, ağırlıkça yüzdelerin örtüştüğü görülmektedir. Du ve arkadaşlarının [10], Ti6Al4V titanyum alaşımını 1000°C sıcaklıkta kutu sementasyonu yöntemiyle yaptığı alüminyum kaplama işleminde, benzer bir şekilde kaplamanın tabakalı yapıda olduğu ve yukarıdan aşağıya doğru sırasıyla TiAl<sub>3</sub>, TiAl<sub>2</sub> ve TiAl fazlarından oluştuğu görülmüştür. Alüminyum kaplama sonrası oluşan fazlardan TiAl<sub>3</sub> tabakası altlık malzemesinin oksidasyon direncini arttırmaktadır. TiAl<sub>3</sub>, hafifliği ve içerdiği yüksek alüminyum miktarından dolayı yüksek sıcaklıklarda oksidasyona karşı direnci nedeniyle öneme sahiptir [11].

(a)



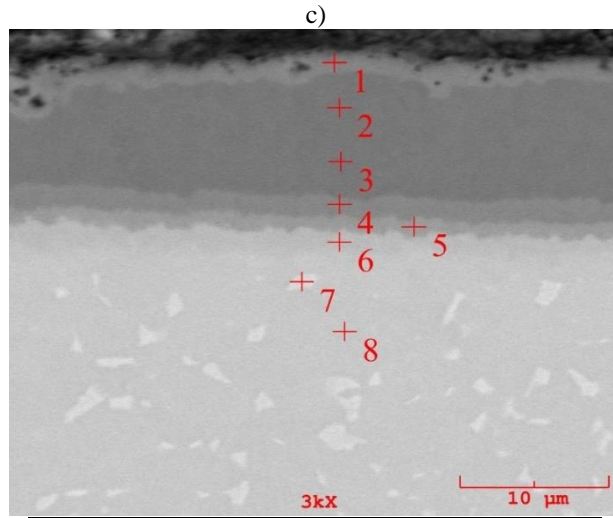
No	ağ. %		
	Al	Ti	V
1	68,388	31,612	-
2	69,036	30,964	-
3	59,490	40,510	-
4	45,428	54,572	-
5	8,149	89,569	2,283
6	5,748	81,108	13,144

b)



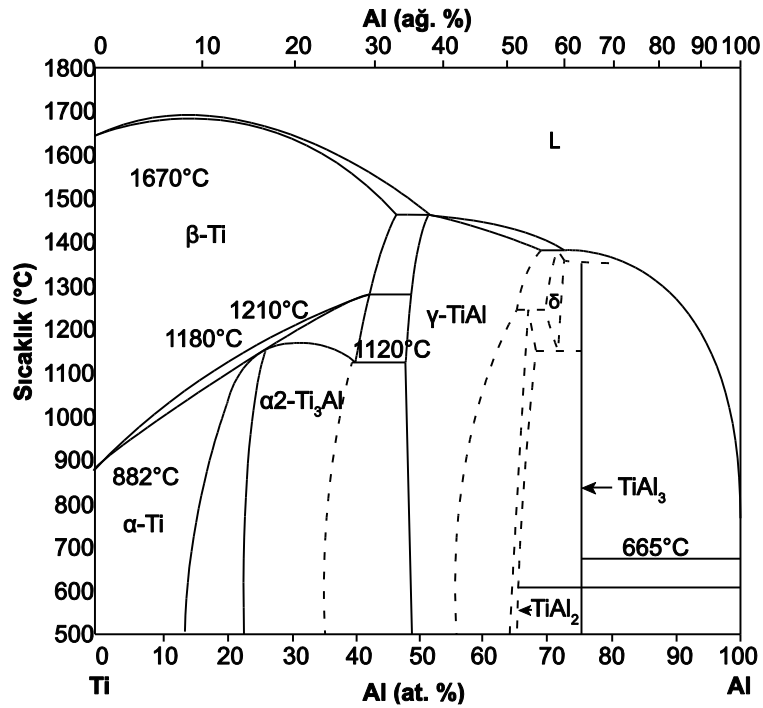
No	ağ. %			
	Ti	Al	O	V
1	31,160	68,616	0,224	-
2	31,415	68,570	0,015	-
3	32,063	67,935	-	-
4	33,363	66,637	-	-
5	42,050	57,950	-	-
6	59,735	40,265	-	-
7	82,112	15,712	-	2,176
8	80,715	4,484	-	14,801
9	88,721	8,469	-	2,810





No	ağ. %			
	Ti	Al	V	O
1	38,030	61,288	-	0,651
2	30,393	68,784	-	1.323
3	30,312	69,688	-	-
4	40,401	59,598	-	-
5	60,903	39,097	-	-
6	78,026	18,666	3,308	-
7	77,734	5,465	16,801	-
8	88,797	8,313	2,890	-

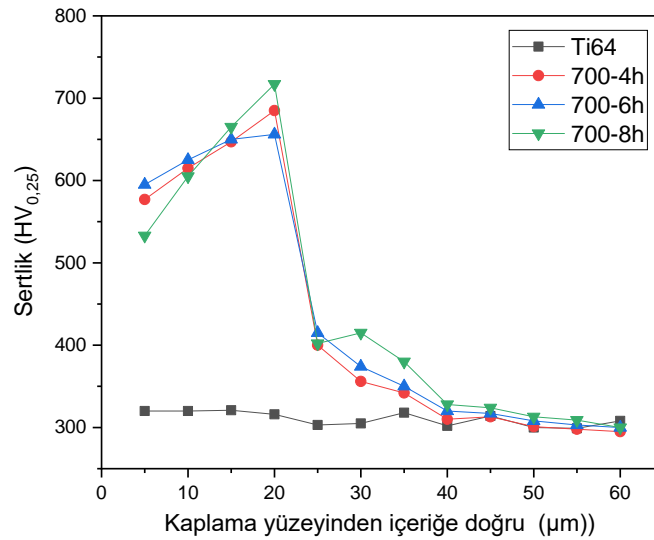
Şekil 3.4. Ti6Al4V alaşımının 700° C sıcaklıkta a) 4, b) 6 ve c) 8 saat alüminyumlanmış numunelerin SEM-EDS analizi



Şekil 3.5. Ti-Al faz diyagramı [12]



Numunelerin mikro sertlikleri Vickers elmas piramit uç kullanılarak 15 gr yük altında 10 saniye süre ile oluşturulan iz yardımı ile belirlenmiştir. Sertlik değerleri 5 ayrı ölçümün ortalamasıdır. Elde edilen sertlik değerlerinin ortalaması alınarak, sonuçlar Şekil 3.6.'da verilmiştir. 700°C sıcaklıkta 4,6 ve 8 saat alüminyumlanmış, TiAl<sub>3</sub> kaplamalardan alınan sertlik değerleri, Ti6Al4V titanyum alaşımının sertlik değeri olan 320±15 HV'den yüksek olup 4 saatte 595±20 HV, 6 saatte 650±15 HV ve 8 saatte 570±15 HV olarak belirlenmiştir. Sertlik değerleri karşılaştırıldığında en yüksek sertlik değerinin 6 saat alüminyumlanmış numunede görüldüğü açıktır. Bu artış yoğun bir alüminid tabakasının oluşumuna işaret etmektedir. Rastkar ve arkadaşları [13] Ti-45Al-2Nb-2Mn-1B titanyum alaşımını kutu sementasyon yöntemiyle 750°C sıcaklıkta alüminyum kaplaması sonucunda TiAl<sub>3</sub> esaslı kaplama üretmişler ve benzer olarak altlık malzemeden (330 HV) kaplamada daha yüksek bir sertlik (600 HV) elde etmişlerdir. Aynı şekilde Gök [14] farklı yöntemlerle titanyum alüminyum intermetalik kaplama oluşturulması çalışmasında TiAl<sub>3</sub> alaşımının enine kesitinden aldığı sertlik değeri benzer şekilde 576 HV sertlik değerini bulmuştur. Bu çalışmada elde edilen sertlik değerlerinin literatür ile uyumlu olduğu görülmüştür.



Şekil 3.6. Ti6Al4V alaşımının 700° C sıcaklıkta 4, 6 ve 8 saatte yüzeyinde oluşan titanyum alüminid tabakasının yüzeyden içeriye doğru mikrosertlik dağılımı

#### 4 Sonuçlar

Bu çalışmada aşağıdaki sonuçlar çıkarılabilir:

- 1) Ti6Al4V alaşımının kutu sementasyonu yöntemiyle alüminyum kaplama sonucunda yüzeyde homojen ve sürekli bir alüminyumca zengin kaplama tabakasına, 700°C sıcaklık 6 saat tutma süresinde ulaşılmıştır.
- 2) Kaplama tabakası kalınlığı sürenin armasıyla birlikte, 4 saatte 10 µm iken 6 saatte 18 µm şeklinde artmış fakat 8 saatte 13 µm şeklinde bir düşüş olmuştur.

- 3) XRD ve SEM analizlerinde kaplama tabakasında Ti-Al denge diyagramında yer alan TiAl<sub>3</sub>, TiAl<sub>2</sub> ve TiAl fazlarından oluşan çok katmanlı bir intermetalik kaplama tabakası oluşmuştur.
- 4) Kaplama süresine bağlı olarak sertliğin 595 HV, 650 HV ve 570 HV değerleri arasında değiştiği görülmüş ve en yüksek sertlik değerinin 6 saat alüminyumlanmış numunede olduğu tespit edilmiştir.

## 5 Beyanname

### 5.1 Teşekkür

İntermetalikler konusunda ve birçok alanda ülkemize, üniversitemize büyük katkılar sunan, biz öğrencilerimizi aydınlatan, yol gösteren, çalışmalarımıza ışık tutan, yeri hiçbir zaman dolmayacak kıymetli hocam, Merhum, Prof.Dr. Sakin Zeytini'ni saygı ve özlemle anıyorum.

### 5.2 Rakip Çıkarlar

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

### 5.3 Yazarların Katkıları

**1. Ferhat YILMAZ:** Makaleye katkısı. (Deneysel çalışma yapmak, verileri düzenlemek ve raporlamak, araştırma sırasında literatür taraması için sorumluluk almak, sonuçların açıklanması ve sunulması için sorumluluk almak, araştırma sırasında literatür taraması için sorumluluk almak.)

**2. Gözde ÇELEBİ EFE:** Makaleye katkısı. (Makalenin tamamının veya ana kısmının oluşturulması için sorumluluk almak, verilerin sadece yazım ve dilbilgisi açısından değil, aynı zamanda entelektüel içerik veya diğer katkılar açısından da yeniden işlenmesini düzenlemek ve raporlamak.)

**3. Sorumlu Yazar Tuba YENER:** Makaleye katkısı. (Araştırma için fikir geliştirmek, sonuçlara ulaşmak için materyal ve yöntemleri planlamak, deneyler için sorumluluk almak, sonuçların açıklanması ve sunulması için sorumluluk almak, makalenin tamamının veya ana bölümünün oluşturulması için sorumluluk almak.)

## Kaynakça

- [1] W. Yang *et al.*, "Evaluation of growth kinetics of aluminide coating layers on Ti6Al4V alloys by pack cementation and the oxidation behaviours of the coated Ti6Al4V alloys," *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.*, vol. 101, p. 105642, Dec. 2021, doi: 10.1016/J.IJRMHM.2021.105642.
- [2] T. Yener, "Chromium-Aluminide Coatings via Pack Cementation Method on Inconel 718 Alloy and Fe-Cr-Ni SuperAlloy," *Sak. Univ. J. Sci.*, vol. 23, no. 5, pp. 817–823, Oct. 2019, doi: 10.16984/taufenbilder.495407.
- [3] T. Yener, "Low temperature aluminising of Fe-Cr-Ni super alloy by pack cementation," *Vacuum*, vol. 162, no. September 2018, pp. 114–120, 2019, doi: 10.1016/j.vacuum.2019.01.040.
- [4] F. J. Pérez, M. P. Hierro, F. Pedraza, M. C. Carpintero, C. Gómez, and R. Tarín, "Effect of fluidized bed CVD aluminide coatings on the cyclic oxidation of austenitic AISI 304 stainless steel," *Surf. Coatings Technol.*, vol. 145,

- no. 1–3, pp. 1–7, Aug. 2001, doi: 10.1016/S0257-8972(01)01019-2.
- [5] K. M. Döleker *et al.*, “Enhancing the wear and oxidation behaviors of the Inconel 718 by low temperature aluminizing,” *Surf. Coatings Technol.*, vol. 412, p. 127069, Apr. 2021, doi: 10.1016/J.SURFCOAT.2021.127069.
- [6] T. Yener, A. Erdogan, M. S. Gök, and S. Zeytin, “Formation, characterization, and wear behavior of aluminide coating on mirrax® ESR steel by low-temperature aluminizing process,” *J. Tribol.*, vol. 143, no. 1, 2021, doi: 10.1115/1.4047667.
- [7] A. Erdogan, T. Yener, K. M. Doleker, M. E. Korkmaz, and M. S. Gök, “Low-temperature aluminizing influence on degradation of nimonic 80A surface: Microstructure, wear and high temperature oxidation behaviors,” *Surfaces and Interfaces*, vol. 25, p. 101240, Aug. 2021, doi: 10.1016/J.SURFIN.2021.101240.
- [8] T. Yener, K. M. Doleker, and A. Erdogan, “High temperature oxidation behavior of low temperature aluminized Mirrax® ESR steel,” *Mater. Res. Express*, vol. 6, no. 11, 2019, doi: 10.1088/2053-1591/ab4541.
- [9] S. S. Rahman, M. Z. I. Ashraf, M. S. Bashar, M. Kamruzzaman, A. K. M. Nurul Amin, and M. M. Hossain, “Crystallinity, surface morphology, and chemical composition of the recast layer and rutile-TiO<sub>2</sub> formation on Ti6Al4V ELI by wire-EDM to enhance biocompatibility,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 93, no. 9–12, pp. 3285–3296, 2017, doi: 10.1007/s00170-017-0772-5.
- [10] H. Du, N. Tan, L. Fan, J. Zhuang, Z. Qiu, and Y. Lei, “Formation mechanism of aluminide diffusion coatings on Ti and Ti6Al4V alloy at the early stages of deposition by pack cementation,” *Materials (Basel)*, vol. 12, no. 19, 2019, doi: 10.3390/ma12193097.
- [11] R. Khoshhal, “Effect of TiAl<sub>3</sub> Coating Thickness and Morphology, Formed Using the Immersion of Titanium Sheets in Molten Aluminum, on Titanium Oxidation Behavior,” *Met. Mater. Int.*, vol. 25, no. 2, pp. 449–455, Mar. 2019, doi: 10.1007/S12540-018-0183-7/FIGURES/9.
- [12] The Materials Information Society, “ASM Handbook Volume 3 - Alloy Phase Diagrams,” *ASM Handbook*. 1992. doi: 10.1007/BF02869318.
- [13] A. R. Rastkar, P. Parseh, N. Darvishnia, and S. M. M. Hadavi, “Microstructural evolution and hardness of TiAl<sub>3</sub> and TiAl<sub>2</sub> phases on Ti-45Al-2Nb-2Mn-1B by plasma pack aluminizing,” *Appl. Surf. Sci.*, vol. 276, pp. 112–119, Jul. 2013, doi: 10.1016/j.apsusc.2013.03.043.
- [14] O. Gök, “Farklı Yöntemlerle Titanyum Alüminyum İntermetalik Kaplama Oluşturulması Çalışması,” İstanbul Teknik Üniversitesi, 2016.



© 2020 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).