

AKÜ FEMÜBİD 16 (2016) 035702 (727-733)
DOI: 10.5578/fmbd.34254

AKU J. Sci. Eng. 16 (2016) 035702 (727-733)

Araştırma Makalesi / Research Article

Kobalt Esaslı Metalik Cam Kaplamaların Pnömatik Sıkıştırma Yöntemi ile Sentezlenmesi

Ziya Özgür Yazıcı¹, Aytekin Hitit¹

¹Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Bölümü, Afyonkarahisar.

e-posta: zyazici@aku.edu.tr

Geliş Tarihi: 30.05.2016 ; Kabul Tarihi: 07.11.2016

Özet

Metalik camlar yüksek dayanım, sertlik ve korozyon direnci gibi üstün özelliklere sahiptirler. Fakat metalik camların üretiminin zor olması ve yüksek saflıktaki bileşenlerin kullanımı nedeniyle maliyetleri yüksektir. Bu sınırlamaya alternatif olarak metalik cam alaşımları kompozit bir malzeme bünyesine yüzey kaplama elemanı olarak dahil edilirse, maliyet problemlerine çözüm sağlayabilecektir. Amorf yapıya sahip bir kaplamanın üretimi düşünüldüğünde, hem hızlı soğutma koşullarını karşılayan hem de kaplama malzemesini altlık yüzeyine yayabilen bir kaplama sistemine ihtiyaç duyulur. Bu çalışmada küçük parçaların kaplanmasında kullanılabilen pnömatik destekli bir sıkıştırma aparatı tasarlanmıştır. Bu yolla, sıvı haldeki bir alaşımın çarpma etkisi ile altlık yüzeyine sıkıştırılması ve hızlı bir şekilde soğutulması eşzamanlı olarak sağlanmıştır. Bu kapsamda, 20-80 µm kalınlığında ve $Co_{43}Cu_1Fe_{20}Ta_{5,5}B_{26,5}Si_5$ kompozisyonuna sahip amorf kaplamalar farklı metal altlık yüzeylerinde üretilmiştir. Altlık yüzeyleri üzerindeki kaplama tabakalarının yapısal ve termal karakteristikleri XRD, SEM ve DSC analizleri ile değerlendirilmiştir. Mikroyapısal analizler, nispeten daha kalın altlık malzemesi kullanımının tamamen amorf kaplama tabakası elde etmede faydalı olduğunu, ince altlık malzemeleri kullanıldığında ise kaplamanın arayüzey civarındaki belirli bir kısmının kristallenmesine neden olduğunu göstermiştir. Altlık malzemelerine göre çok daha sert özellikteki yeni yüzeylerin sertlikleri yaklaşık 1000 Vickers sertlik değerlerinde ölçülmüştür.

Anahtar kelimeler

Metalik cam;
Kaplama;
Termal özellikler,
Sertlik

Synthesis of Co-based Metallic Glass Coatings by Pneumatic Squeezing Method

Abstract

Metallic glasses have superior properties such as high strength, hardness and corrosion resistance. However, the production cost of the metallic glasses is very high due to the difficulties in manufacturing and constituents used in high purity. As an alternative to this limitation, if the metallic glass alloys will be considered in the composite material as a surface coating element, it may be provide solutions to the cost problems. When the production of a coating having amorphous structure was considered, a coating system which satisfies rapid cooling capability and also transmits the coating material to the surface of the substrate, is needed. In this study, pneumatic-assisted squeezing apparatus which could be used for coating the small parts was designed. By this way, it was simultaneously provided that the liquid form of an alloy could be cooled rapidly and squeeze to the substrate surface with an impact effect. In this context, amorphous coatings having a composition of $Co_{43}Cu_1Fe_{20}Ta_{5,5}B_{26,5}Si_5$ with thicknesses of 20-80 µm, was produced on the surface of different metal substrates. Structural and thermal characteristics of the coating layers were evaluated by XRD, SEM and DSC analysis. Microstructural analysis showed that relatively thicker substrates used were beneficial to obtain fully amorphous coating layer, while thinner substrates have led to crystallize in a certain amount of coating near the interface. Consequently, metal substrates having relatively low hardness and wear resistance were coated with a Co-based metallic glass by using an alternative method. The hardness of the amorphous coating were measured about 1000 Hv.

Keywords

Metallic glass;
Coating;
Thermal Properties;
Hardness

1. Giriş

Metalik camlar; diğer bir adıyla amorf yapıları alaşımlar yüksek mukavemet, sertlik, korozyon direnci, aşınma direnci gibi mükemmel özellikleri üzerinde barındıran yeni bir metalik alaşım ailesidir (Wang, 2012). Amorf yapıda olmaları aynı kompozisyona sahip kristal karışımlarına göre bu avantajlı özellikleri sağlamaktadır. Bu alaşımlar arasında, yüksek dayanım ve iyi manyetik özellikleri nedeniyle, kobalt ve demir esaslı amorf alaşımlar üzerinde yaygın bir şekilde çalışma yapıldığı görülmektedir. $Co_{43}Fe_{20}Ta_{5.5}B_{31.5}$ camı alaşımı 5185 MPa'lık kırılma dayanımı ile verilebilecek örneklerdendir (Inoue et al. 2006). Bu alaşımın camlaşma kabiliyeti 2 mm olarak rapor edilmesine rağmen, Cu ve Si elementlerinin uygun oranda ilaveleri sonucunda kritik döküm kalınlığı 6 mm'ye geliştirilmiştir (Yazıcı et al. 2016). Ayrıca, Zhang ve ark. $Co_{43}Fe_5Cr_{15}Mo_{14}C_{15}B_6Er_2$ alaşımının kritik döküm kalınlığını 15 mm'ye kadar üretilbildiklerini bildirmişlerdir (Zhang et al. 2011). Ancak bu alaşımlar üretim zorlukları, yüksek saflıkta hammadde gereksinimi, düşük tokluk ve yüksek maliyet gibi çeşitli dezavantajlar sergilemektedirler. Üstün özelliklerine rağmen metalik camların uygulamaları bu dezavantajlar nedeniyle sınırlı kalmıştır (Ashby, and Greer, 2006). Bu nedenle yapılan son çalışmalar metalik cam alaşımlarının kaplama malzemesi olarak değerlendirilerek nispeten yumuşak ve aşınma direnci düşük olan metallerin zorlu koşullara olan dayanımlarının geliştirilmesi üzerinedir. Bununla birlikte tane sınırı içermeyen amorf kaplama sayesinde korozyon direnci önemli derecede artırılabilir (Yu et al. 2009). Böylece amorf malzemenin yüksek maliyet ve düşük tokluk gibi dezavantajları, kaplama görevini üstlendiği bir kompozit uygulamasında azaltılabilmekte ve faydalı bir şekilde kullanılabilme potansiyeli kazanmaktadır.

Literatürde farklı prensipler altında çalışan kaplama yöntemleri mevcuttur. HVOF (Koutsy, 2004, Kim et al. 2001), plazma sprej (Kobayashi et al. 2008, Kishitake et al. 1996) ve elektrik-ark sprej (Cheng et al. 2009) gibi geniş yüzeylere uygulanabilen termal yöntemlerde kaplama kalınlığı ve özellikleri açısından önemli gelişmelerin elde edildiği

görülmektedir. Plazma sprej prosesinde başlangıç tozları bir plazma torcunda ergitilmekte ve sonra altlık yüzeyine iletilerek hızlı bir şekilde soğutulmaktadır (Shen et al. 2005). Amorf yapının oluşturulması için gerekli kritik soğutma hızı demir esaslı metalik cam alaşımları için yaklaşık olarak 10 K/s'dir (Shen et al. 2005). Dolayısıyla bu yöntemde eriyik malzemenin homojen bir kaplama halinde altlık yüzeyinde üretilmesi oldukça zordur. Bundan başka, oluşan poroziteler ve tabakalı (lamelar) yapı nedeniyle plazma sprej kaplamalar yeterli koruma sağlayamamaktadır. Ayrıca termal spreyleme yöntemlerinde besleme ve spreyleme problemlerinden kurtulmak için belirli boyut ve dağılıma sahip tozlar tercih edilebilmektedir. Diğer bir konu ise, nano boyutlu tozlar termal jet içerisine girdiğinde, küçük tozlar aglomere olabilmektedir (Branagan et al. 2001). Buna ek olarak, son derece küçük bu partiküllerin kullanımında uygun bir ergime davranışı ile jet içerisinden geçememe veya çeşitli oksitlenme problemleri de yaşanabilmektedir (Joshi et al. 2015). Ayrıca HVOF gibi termal spreyleme yöntemlerinde amorf bir kaplama sadece amorf tozların üretimiyle gerçekleştirilmektedir (Terajima et al. 2010). HVOF alevinde cam geçiş sıcaklığına ısıtılan metalik cam tozları, liküdü sıcaklığının çok altındaki bu sıcaklık civarında aşırı soğutulmuş sıvı hale geçerek viskoz akışkanlık gösterir. Böylece yüksek kalitedeki metalik cam kaplamalar HVOF spreyleme ile elde edilebilmektedir (Terajima et al. 2010). Ancak genel olarak bu tip kaplama yöntemlerinde yüksek yoğunluk, düşük porozite, oksitsiz yapı gibi çeşitli özellikleri de üzerinde taşıyan kaplamaların üretilmesi için çalışmaların devam ettiği görülmektedir (Kobayashi et al. 2008).

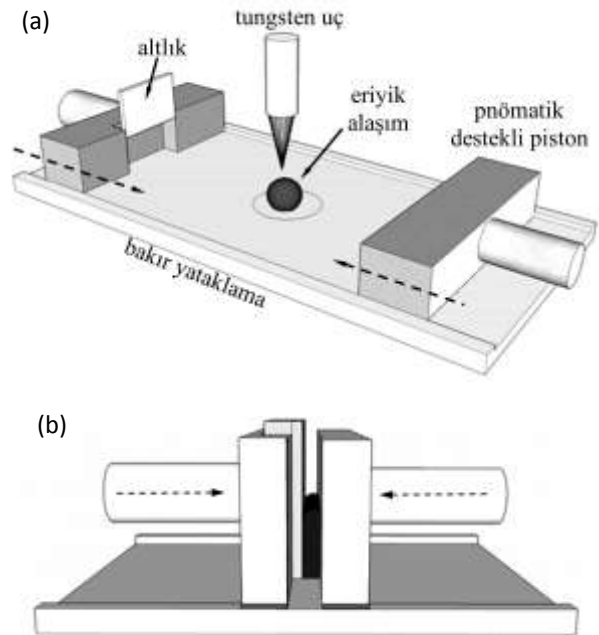
Geçmişte piston-örs yöntemi Pietrowsky (1963) tarafından tasarlanmış ve amorf alaşımların folyo halinde üretilmesi sağlanmıştır. Piston-örs yöntemi sıvı haldeki bir metal damlacığının iki metal plaka arasında hızlı bir şekilde sıkıştırılarak folyo halinde katılaştırılması işlemidir. İlk başta küresel olan damlacık iki yüzey arasında sıkışıkça yayılır ve hızlı soğutma sağlanır. Ancak elde edilen soğutma hızları eriyik döndürme yöntemi kadar

yüksek olmamaktadır [Elliot R., 2013,]. Bu yöntem altlık malzemesi ile birlikte düşünülerek modifiye edildiğinde amorf yapılı kaplama üretimi için de uygun bir yöntem olarak görünmektedir. Literatürde piston-örs yönteminden faydalanılarak folyo şeklinde numunelerin üretildiği çalışmalar bulunmasına rağmen, kaplama işleminin yapıldığı bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu çalışmada, termal toz kaplama proseslerinde gözlenen komplikasyonlardan bağımsız, tek adımlı ve yerinde bir yöntem geliştirmek amacıyla hareket edilmiş ve ark ergitme koşulları altında çalışan pnömatik destekli bir sıkıştırma aparatı vasıtasıyla $Co_{42}Cu_1Fe_{20}Ta_{5,5}B_{26,5}Si_5$ alaşımının farklı altlıklar üzerine kaplanması üzerinde çalışılmış ve üretilen kaplamanın özellikleri incelenmiştir.

2. Materyal ve Metot

Deneysel çalışmalarda kaplama malzemesi olarak yüksek camlaşma kabiliyetine sahip ve nominal bileşimi $Co_{42}Cu_1Fe_{20}Ta_{5,5}B_{26,5}Si_5$ olan alaşım seçilmiştir. Alaşım numuneleri yüksek saflıktaki Co (% 99,8), Cu (% 99,7), Fe (% 99,9), Ta (% 99,9), B (% 98,0), Si (% 99,9) elementel tozlarının homojen karıştırılmasıyla elde edilmiştir. Toz halindeki karışım hidrolik preste tablet haline getirilerek preslenmiş ve daha sonra argon gazı atmosferli ark ergitme işlemi ile ergitilmiştir. Ergitme işlemi kimyasal homojenliğin sağlanması açısından üç kere tekrarlanmıştır. Ergitme atmosferi koşulları ergitme haznesinin vakuma (10^{-2} mbar) alındıktan sonra hazne içerisine argon gazının doldurulması (1 atm) ile oluşturulmuştur. Tablet halindeki tozlar tamamen sıvı hale gelecek şekilde belirli bir süre 150 A'de ergitilmiştir. Ergitilen bu alaşım master alaşım olarak adlandırılmıştır. Daha sonra, master alaşımdan uygun miktarda parçalar alınarak vakum ergitme haznesi içerisinde ve Şekil 1'de şematik olarak gösterilen pnömatik destekli sıkıştırma aparatı vasıtasıyla metal altlıklar üzerine sıkıştırılarak kaplanmıştır. Kaplama işlemi pnömatik sıkıştırma basıncı (5 bar) ile hareket eden iki piston arasında gerçekleştirilmiştir. Sıkıştırma işlemi esnasında uygun miktardaki master alaşım parçası koruyucu atmosfer koşulları altında 150 A'de ergitilmiş ve ergitme işlemi ile eşzamanlı olarak iki

piston arasında ~ 400 m/s hız ile sıkıştırılmıştır (Öztürk and Hitit, 2015). Sıkıştırma işleminde kullanılan pistonlardan birisi düz yüzeye sahip bakır blok, diğeri ise kaplanacak olan altlık metalin yerleştirildiği bakır bloktan ibarettir. Böylece sıkıştırma işlemi esnasında sıvı haldeki alaşım, altlık metal plaka yüzeyi ve sıkıştırıcı bakır yüzey arasında ezilerek aşırı hızlı soğutulması sağlanabilmektedir. Altlık olarak üç farklı metal (alüminyum, çelik ve galvanizli çelik) plaka ve levhalar kullanılmıştır. Kaplama işlemi öncesinde ise plakaların yüzeyleri zımparalama işlemleri ile parlatılmış ve aseton ile temizlenmiştir. Yapısal ve mikroyapısal incelemeler sırasıyla XRD (Shimadzu 6000 XRD) ve SEM (LEO-1430 VP) analizleri ile gerçekleştirilmiştir. Elde edilen cam kaplamanın termal özellikleri argon atmosferi altında ve 0,33 K/s ısıtma hızıyla gerçekleştirilen DSC (Netzsch STA 409 Pc/Pg) analizi ile belirlenmiştir. Sertlik ölçümleri 2,94 N'luk yük ve 15 sn bekleme süresi ile Vickers sertlik cihazı (Shimadzu HMV-2L) kullanılarak belirlenmiştir. Sertlik ölçümleri, metalografik hazırlama aşamalarından geçirilen numunelerin kesit yüzeylerinde oluşturulan 15 iz ölçümünün ortalaması alınarak gerçekleştirilmiştir.

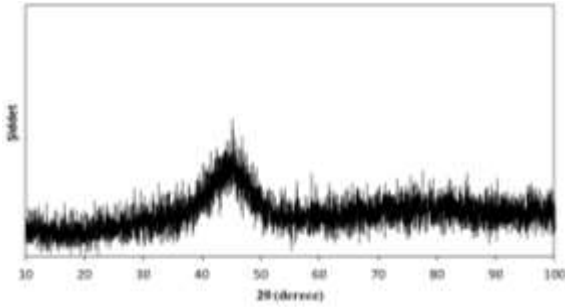


Şekil 1. (a) Pnömatik destekli sıkıştırma yönteminin şematik görünümü ve (b) sıkıştırma prosesi

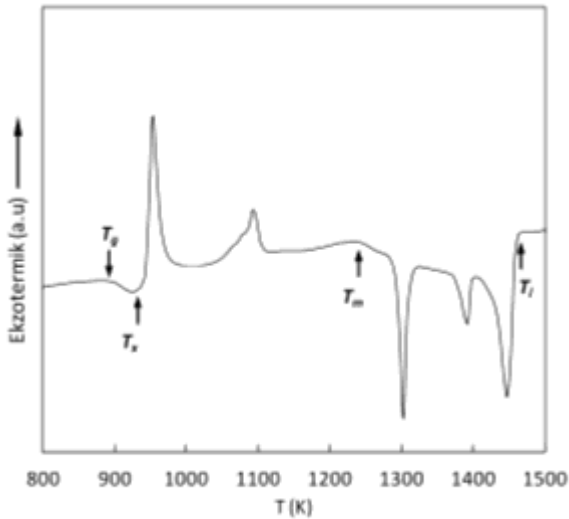
3. Bulgular

3.1. Kaplamanın mikroyapısal ve termal özellikleri

Şekil 2’de 150 A akım değerinde ergitilmiş ve 5 bar sıkıştırma basıncı altında metal altlık yüzeyine kaplanmış kobalt esaslı metalik cam tabakasının XRD desenleri verilmiştir. Kaplamanın üst yüzeyinden yapılan analiz sonucunda 40-50 2 θ değerleri arasındaki keskin pikler içermeyen geniş XRD deseni tespit edilmiştir. Bu sonuç, XRD analizinin çözünürlük sınırları içerisinde amorf yapılı metal kaplamanın başarılı bir şekilde üretilebildiğinin bir göstergesidir. Üretilen camsı kaplamanın termal kararlılığı ve diğer termal özelliklerinin belirlenmesi amacıyla yapılan termal analiz eğrisi ise Şekil 3’te verilmiştir.



Şekil 2. Metal altlık üzerine kaplanan metalik cam kaplamanın XRD analizi



Kompozisyon	T _g	T _x	T _m	T _l
Co ₄₂ Cu ₁ Fe ₂₀ Ta _{5,5} B _{26,5} Si ₅	896	944	1287	1460

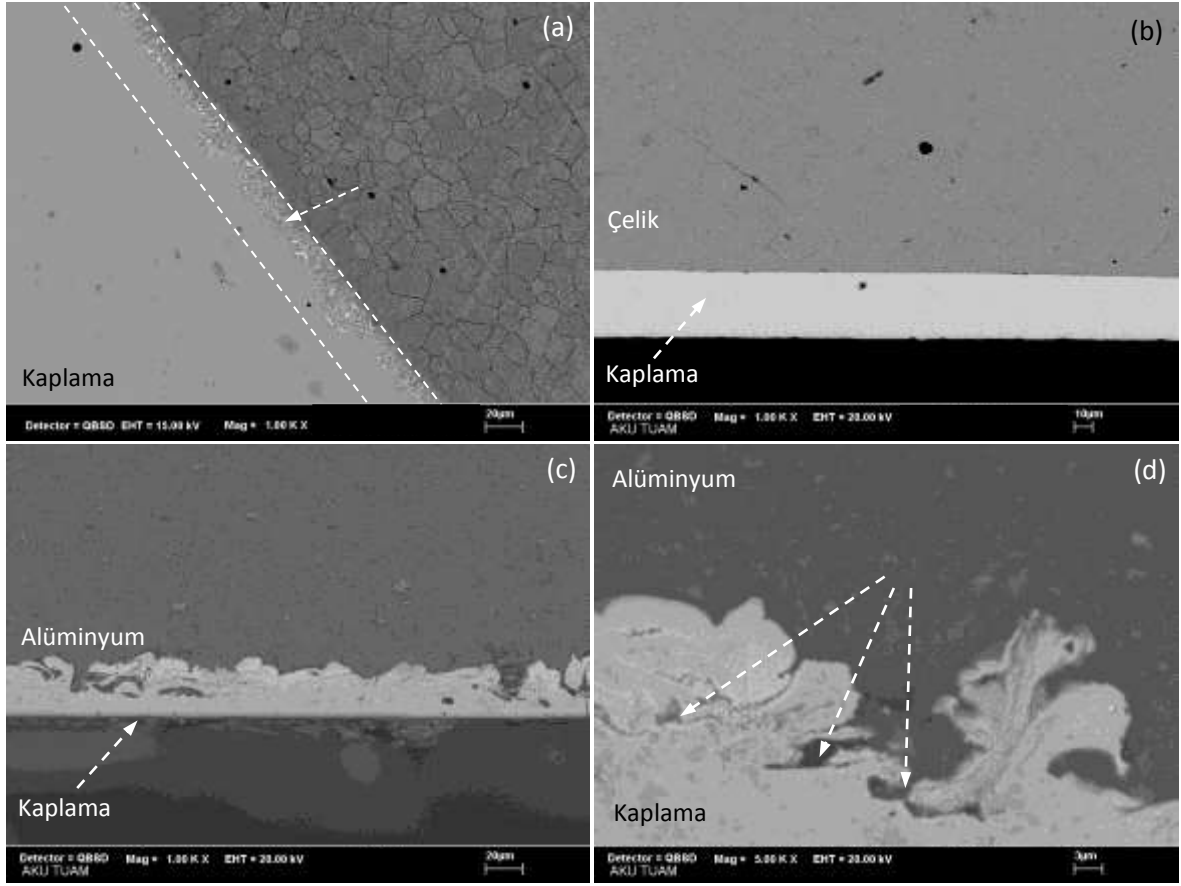
T_g, T_x: cam geçişi ve kristallenme sıcaklıkları

T_m, T_l: ergime ve liküdü sıcaklıkları

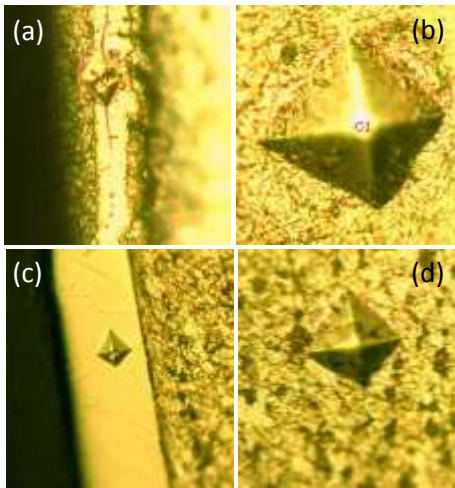
Şekil 3. Çelik plaka üzerinde 50 μ m kalınlığında elde edilen kaplamanın termal analizi

DSC eğrisi incelendiğinde, 896 K’de belirgin endotermik bir davranışla cam geçişi (T_g) davranışının sergilendiği gözlenmektedir.

Sıcaklığın artmasıyla birlikte 944 K’de başlayan keskin ekzotermik pik amorf yapının ilk kristallenme (T_x) basamağına ulaştığını göstermektedir. Amorf yapı üç basamaklı bir kristallenme davranışıyla birlikte tamamen kristal yapıya ulaşmakta ve sonra 157 K’lik (T_r-T_m) geniş bir ergime aralığından geçerek tamamen sıvı hale gelmektedir. Kaplamanın 0,33 K/s ısıtma hızıyla tespit edilen termal özellikleri Şekil 3’te listelenmiştir. Şekil 4.a-d’te sırasıyla galvanizli sac levha, düşük karbonlu çelik ve alüminyum altlıklar üzerine kaplanmış amorf tabakaların mikroyapısal görüntüleri verilmiştir. Şekil 4’te verilen mikroyapı fotoğrafları 5 bar sıkıştırma basıncı ile metal altlık yüzeyleri üzerinde 20-80 μ m kalınlığındaki kaplamaların elde edilebildiğini göstermektedir. Galvanizli çelik altlığın kalınlığı (<0,5 mm) diğerlerinden (2-3 mm) daha ince olması nedeniyle 5 bar’lık sıkıştırma esnasında sıcaklığın da etkisiyle altlığın deforme olmasına neden olabilmektedir. Bu nedenle diğer numunelerden farklı olarak, galvanizli çelik levhanın altlık olarak kullanıldığı durumda daha düşük sıkıştırma basıncı kullanılmıştır. Kullanılan düşük sıkıştırmanın etkisiyle eriyiğin ısı transferinin daha zor olduğu ve eriyiğin kalıba temas ettiği andaki yüksek sıcaklıkların altlık yüzeyini daha yüksek sıcaklıklara ulaştırdığı söylenebilir. Şekil 4a’da kesikli oklarla gösterilen bu durum, galvanizli çelik levha ve amorf kaplama arayüzeyinde belirgin şekilde kristallenmenin meydana gelmesinden anlaşılmaktadır. Arayüzeyde meydana gelen kristal fazların tantal elementince zengin (Co,Fe)_{20,82}Ta_{2,18}B₆ fazı ve (Co,Fe₂)B karışımını içermektedir [Yazıcı, Z.O, 2016]. Kalınlığı <0,5 mm olan galvanizli plakanın ince olması nedeniyle fazlaca ısınmakta ve ısı transfer problemine neden olarak arayüzeyin kristallenmesine neden olduğu düşünülmektedir.



Şekil 4. Co-esaslı metalik cam kaplamalı (a) galvanizli plaka, (b) çelik, (b,c) alüminyum altlıkların mikroyapı görüntüleri



Altlık Malzemesi	Sertlik (Hv) (Altlık)	Sertlik (Hv) (Kaplama)
Alüminyum	84	974
Çelik	170	1005

Şekil 5. (a,c) Metalik cam kaplama, (b) alüminyum ve (d) çelik altlık üzerinde oluşturulan Vickers indantasyon izleri

Buna rağmen, arayüzeyden kaplamanın dış yüzeyine doğru, yani karşıt durumdaki sıkıştırıcı piston yüzeyinin temas ettiği kısımların amorf olarak katılaştığı mikroyapı görüntülerinden açıkça görülmektedir. Arayüzey özellikleri açısından diğer metal altlıklar incelendiğinde, kristallenme davranışı gözlenmemiştir. Sadece düşük ergime sıcaklığına sahip olan alüminyum altlığın yüksek sıcaklıktaki kaplama ile etkileşerek bir miktar eriyerek kaplama tabakası ile karışma davranışı içinde olduğu (Şekil 4d) gözlenirse de, çelik altlıkta homojen bir amorf kaplama tabakasının olduğu görülmektedir. Amorf tabakanın alüminyum altlık ile olan karışma eğilimi, sıkıştırmanın son aşamasında alüminyum ile temas eden sıvı alaşımın altlığın yüzeyini bir miktar eritmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Çelik altlıkta böyle bir durum mümkün değildir, çünkü sıvı kaplama

nispeten daha yüksek ergime sıcaklığına sahip olan çelik altlık yüzeyine etkileyemeden katılışmaktadır. Çalışmalar esnasında, kaplama işlemleri nispeten sertliği ve aşınma direnci düşük metal altlık yüzeylerine uygulanmıştır. Metalik cam malzemelerin sertliğinin ve dayanımının yüksek olması bu malzemelerin çizilme ve aşınma dirençlerine katkı sağlayacağı düşünülmektedir. Aşınma ve çizilme direnci malzemelerin sertlikleriyle ilişkili olduğu için, bu kapsamda kaplanmış numunelerin yüzeylerinin sertlikleri ölçülmüştür. Şekil 5'te metalik cam kaplama, çelik ve alüminyum altlıkların kesit yüzeylerinde oluşturulan Vickers indentasyon izleri görülmektedir. Açık olarak metalik cam kaplamada oluşturulan sertlik izinde çatlama meydana gelmesi gevrekliğin göstergesi olmakla birlikte, sertlik değeri yaklaşık 1000 Hv civarındadır (Şekil 5a). Dolayısıyla düşük sertliğe sahip metal altlıkların aşınma veya çizilme dirençleri yüzeylerindeki amorf kaplama sayesinde yükseltilmiştir.

4. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışmada küçük parçaların kaplanmasında alternatif bir yöntem olarak düşünülebilecek pnömatik destekli bir piston sıkıştırma yöntemi tasarlanarak, sıvı hale getirilmiş bir alaşımın sıkıştırma ve çarpma etkisi ile birlikte hızlı soğutulması ve metal altlık yüzeylerine yapıştırılması sağlanmıştır. Bu yöntem ile çeşitli metal altlıkların yüzeyinde $Co_{43}Cu_1Fe_{20}Ta_{5,5}B_{26,5}Si_5$ kompozisyonlu alaşımdan 20-80 μm kalınlığında ve tamamen amorf yapıya sahip kaplamalar üretilmiştir.

Sonuç olarak altlık malzemesi olarak kullanılan alüminyum ve çelik plakaların yüzey sertlikleri, yüzeylerine kaplanan amorf tabaka sayesinde yaklaşık 1000 Hv sertlik değerine yükselmiştir. Ölçülen sertlik değeri Komaki ve ark.nın termal spreyleme yöntemi ile ürettikleri CoFe-esaslı kaplama ile uyumludur [Komaki M. Et al. , 2012]. Bununla birlikte elde edilen kaplamalar tamamen sıvı haldeki alaşımdan üretildiği için porozite içermemektedir. Ayrıca, piston-örs yönteminin modifiye edilmesi ile tasarlanan bu yöntem, metalik cam malzemelerin kaplama olarak sentezlenmesine, tabakalı kompozit üretimine,

ergitme ve kaplama işlemlerinin eşzamanlı yapılabilmesine imkan vermesi açısından küçük parçaların endüstriyel hızlı üretim koşulları için özgün ve ilgi çekici görünmektedir.

Kaynaklar

- Ashby, M.F., Greer, A.L., 2006, Metallic glasses as structural materials, *Scripta Materialia*, 54, 321-326
- Branagan, D.J., Swank, D.C., Haggard, D.C., Fincke, J.R., 2001, Wear resistant amorphous and nanocomposite steel coatings, *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol.32A, October, 2615-2621
- Cheng, J.B., Liang, X.B., Xu B.S, Wu, Y.X., 2009, Formation and properties of Fe-based amorphous/nanocrystalline alloy coating prepared by wire arc spraying process, *Journal of Non-Crystalline Solids*, 355, 1673-1678
- Elliot R., 2013, *Eutectic Solidification Processing: Crystalline and Glassy Alloys*, Elsevier, 352-353
- Inoue, A., Shen, B.L., Chang, C.T., 2006, Fe- and Co-based bulk glassy alloys with ultrahigh strength of over 4000 MPa, *Intermetallics*, 14, 936-944
- Joshi, S.S., Katakam, S., Arora H.S., Mukherjee, S., Dahotre, N.B., 2015, Amorphous Coatings and Surfaces on Structural Materials, *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*, 41:1, 1-46, DOI:10.1080/10408436.2015.1053602
- Kim, H.J., Lim, K.M., Seong, G.G., Park, C.G., 2001, Amorphous phase formation of Zr-based alloy coating by HVOF spraying process, *Journal of Materials Science*, 36, 1, 49-54
- Kishitake, K., Era, H., Otsubo F., 1996, Thermal-sprayed Fe-10CM3P-7C amorphous coatings possessing excellent corrosion resistance, *Journal of Thermal Spraying Technology*, 5, 476-482
- Kobayashi, A., Yano, S., Kimura, H., Inoue, A., 2008, Mechanical property of Fe-base metallic glass coating formed by gas tunnel type plasma spraying, *Surf. Coat. Technol.* Vol. 202, 12, , 2513-2518
- Komaki M., Mimura T., Tsuji S., Amiya K., Saotome Y., Yamasaki T., 2012, Influence of Substrate Temperature on the Structure and Cohesive /Adhesive Strength of FeCoSiBNb Metallic Glass Coating Films Produced by Thermal Spraying, *Materials Transactions*, Vol. 53, No. 12, 215-2159
- Koutsky, J., 2004, High velocity oxy-fuel spraying, *Journal of Materials Processing Technology*. 157-158, 557-560

- Öztürk, P., Hitit, A., 2015, Effects of Tungsten and Boron Contents on Crystallization Temperature and Microhardness of Tungsten Based Metallic Glasses, *Acta Metallurgical Sinica (Engl. Lett.)*, 28 (6), 733-738
- Pietrokovsky, P., 1963, Novel Mechanical Device for Producing Rapidly Cooled Metals and Alloys of Uniform Thickness, *Rev. Sci. Instrum.* 34, 445
- Shen, J., Chen, Q., Sun, J., Fan, H., Wang, G., 2005, Exceptionally high glass-forming ability of an FeCoCrMoCBY alloy, *Applied Physics Letters*, 86, 151907
- Terajima, T., Takeuchi, F., Nakata, K., Adachi, S., 2010, Composite coating containing WC/12Co cermet and Fe-based metallic glass deposited by high-velocity oxygen fuel spraying, *Journal of Alloys and Compounds*, 504, 1, 288-291
- Wang, W.H., 2012, The elastic properties, elastic models and elastic perspectives of metallic glasses, *Progress in Materials Science*, 57, 487-656
- Yazıcı, Z.O., Hitit, A., Yalcin, Y., Ozgul, M., 2016, Effects of Minor Cu and Si Additions on Glass Forming Ability and Mechanical Properties of Co-Fe-Ta-B Bulk Metallic Glass, *Met. Mater. Int.*, Vol. 22, No. 1, pp. 50-57
- Yu, P., Chan, K.C., Xia, L., Yu, H.B., Bai, H.Y., 2009, Enhancement of Strength and Corrosion Resistance of Copper Wires by Metallic Glass Coating, *Materials Transactions*, Vol. 50, No. 10, pp. 2451 to 2454
- Zhang, T., Yang Q., Ji YF, Li R., Pang S., Wang, JF., Xu T., 2011, Centimeter-scale-diameter Co-based bulk metallic glasses with fracture strength exceeding 5000 MPa, *Chinese Sci Bull* December, Vol.56 No.36