Fırat Üniv. Müh. Bil. Dergisi
28(2), 201- 206, 2016

Science and Eng. J of Fırat Univ.
28(2), 201- 206, 2016

Yüksek-Sıcaklık Cu-Al-Fe-Co Şekil Hatırlamalı Alaşımının İzotermal Oksidasyon Davranışının İncelenmesi

Köksal YILDIZ
Fırat Üniversitesi, Fen Fakültesi, Fizik Bölümü, 23119, Elazığ
kylidiz@firat.edu.tr

(Geliş/Received: 18.02.2016; Kabul/Accepted: 20.09.2016)

Özet

Bu çalışmada, yüksek-sıcaklık Cu-13Al-5Fe-2Co (ağırlıkça %) şekil hatırlamalı alaşımının 600-900 ^{o}C aralığındaki izotermal oksidasyon davranışı, termo-gravimetrik analiz yöntemi kullanılarak incelendi. Alaşımın izotermal olmayan termo-gravimetrik ölçüm, alaşımın çalışılan oksidasyon sıcaklıklarında parabolik oksidasyon karakteristiğine sahip olduğunu gösterdi. Yaklaşık 75 dakika süreyle oksijen atmosferinde 600, 700, 800 ve 900 ^{o}C'de izotermal olarak gerçekleştirilen oksidasyon ölçümlerinden alaşımın oksidasyon kinetikleri belirlendi. 600, 700, 800 ve 900 ^{o}C olan oksidasyon sıcaklıkları için alaşımın oksidasyon sabitleri (K_p) sırasıyla 3,5234x10^{-4}, 1,9428x10^{-4}, 6,77836x10^{-4} ve 7,5x10^{-3} mg^{2}cm^{-4}s^{-1} olarak hesaplandı. Diğer oksidasyon sıcaklıkları ile mukayese edildiğinde, hem kütle artış eğrilerinden hem de K_p değerlerinden, alaşımın 700 ^{o}C'de daha az oksitlendiği görüldü. Cu-Al-Fe-Co alaşımı için oksidasyon aktivasyon enerjisi 83,0657 kj/mol olarak hesaplandı. Oksitlendirilen numunelerin X-ışını desenlerinin termo-gravimetrik analizler ile uyumlu oldukları ve oksitlendirilen tüm numunelerinin aynı faz bileşenlerine (martensit+Al_2O_3+Fe_3O_4) sahip oldukları tespit edildi.

Anahtar Kelimeler: Şekil Hatırlamalı Alaşım, İzotermal Oksidasyon, Termo-Gravimetrik Analiz.

Investigation of Isothermal Oxidation Behaviour of High-Temperature Cu-Al-Fe-Co Shape Memory Alloy

Abstract

In this work, isothermal oxidation behavior of high-temperature Cu-13Al-5Fe-2Co (in weight, %) shape memory alloy was investigated between 600-900 ^{o}C by using thermo-gravimetric analysis method. Non-isothermal thermo-gravimetric measurement of the alloy indicated that it has parabolic oxidation characteristics at the studied oxidation temperatures. From the oxidation measurements isothermally at temperatures of 600, 700, 800 ve 900 ^{o}C for approximately 75 minutes, oxidation kinetics of the alloy was determined. Oxidation constant (K_p) values of the alloy at oxidation temperatures of 600, 700, 800 ve 900 ^{o}C were calculated as 3,5234x10^{-4}, 1,9428x10^{-4}, 6,77836x10^{-4} ve 7,5x10^{-3} mg^{2}cm^{-4}s^{-1}, respectively. It was seen that the alloy has oxidized lesser at the oxidation temperature of 700 ^{o}C from both mass gain curves and K_p values compared with other oxidation temperatures. The activation energy for oxidation of Cu-Al-Fe-Co alloy was estimated to be 83,0657 kj/mol. It was determined that X ray patterns of the oxidized samples were in harmony with thermo-gravimetric results of the samples and all oxidized samples had the same phase compenents (martensit+Al_2O_3+Fe_3O_4).

Keywords: Shape Memory Alloy, Isothermal Oxidation, Thermo-Gravimetric Analysis.

1. Giriş

Şekil hatırlamalı alaşımlar, uygulanan sıcaklığın artmasıyla orijinal şeklini geri kazanabilme yeteneğine sahip olan şekil hatırlamalı malzemelerin bir sınıfı olarak kabul edilen akıllı malzemelerdir. Bu malzeme sınıfına ait alaşımların var olan eşsiz termo-mekaniksel özellikleri, onları çeşitli mühendislik uygulamaları için kullanışlı aday malzemeler yapmaktadır. Şekil hatırlamalı alaşımlar, genel olarak austenit olarak adlandırılan yüksek sıcaklık fazı ile martensit olarak adlandırılan düşük sıcaklık fazı arasında değişen sıcaklık ile dönüşüm sergileyebilmektedirler ve bu olay tersinebilir martensitik dönüşüm olarak tanımlanmaktadır [1]. Martensitik dönüşüm, atomların malzeme içerisindeki dağılımlarının değişmediği ve yalnızca atomlar arasındaki mesafelerin yeniden düzenlendiği birinci dereceden difüzyonsuz bir faz dönüşümüdür [2].

Günümüzde şekil hatırlamalı alaşımlar çok çeşitli pratik uygulamalar için kullanılmaktadırlar. Özellikle ikili TiNi alaşımları mükemmel şekil hatırlama karakteristiklerinden, yeterli düzeydeki dayanaklıklarından ve sünekliklerinden dolayı en kullanışlı şekil hatırlamalı alaşımlardır. Fakat bunların yanı sıra TiNi alaşımının dönüşüm sıcaklığı genel olarak 120 ^{o}C'den daha yüksek değildir ve günümüzde yüksek sıcaklıklarda kullanıma uygun sensör ve aktüatörlere duyulan gereksinimlerden dolayı 200 ^{o}C'den daha yüksek dönüşüm sıcaklıklarına sahip şekil hatırlamalı alaşımların geliştirilmesine şiddetle ihtiyaç duyulmaktadır. Bununla birlikte, yüksek dönüşüm sıcaklığına sahip bir şekil hatırlamalı alaşımın aynı zamanda hem maliyetinin çok yüksek olmaması hem de işlenebilirliğinin iyi olması gerekmektedir [3]. Genel olarak, yüksek sıcaklık uygulamaları için aday olan şekil hatırlamalı alaşımların dönüşüm sıcaklıklarının 200 ^{o}C'nin üzerinde olması beklenmektedir. Geleneksel şekil hatırlamalı alaşımlar arasında, Cu-Al-Ni alaşım sistemleri iyi termal kararlılıkları, yüksek operasyon sıcaklıkları ve düşük maliyetlerinden dolayı yüksek sıcaklık uygulamaları için potansiyel aday malzemelerdir. Fakat Cu-Al-Ni alaşımlarının yüksek sıcaklıklardaki iyi termal kararlılıklarına rağmen zayıf olan mekaniksel özellikleri onların pratik uygulama alanlarını sınırlandırmaktadır [4-6].

Son yıllarda ikili Cu-Al alaşımlarına Fe ve Ta gibi üçüncü alaşımlama elementlerinin ilave edilmesiyle dönüşüm sıcaklıklarının 200 ^{o}C'nin oldukça üzerine çıktığı yeni yüksek-sıcaklık şekil hatırlamalı alaşım grupları üretilmiştir ve bu yeni alaşım sistemlerinin hem martensitik dönüşüm sıcaklıklarının hem de şekil hatırlama özelliklerinin gerek kompozisyona gerekse de farklı işlem şartlarına (örneğin ısıl işlem) göre nasıl değiştiği hali hazırda araştırılmaktadır [6-10].

Bu çalışmanın amacı, yüksek-sıcaklık Cu-Al-Fe-Co şekil hatırlamalı alaşımının 600 ^{o}C ile 900 ^{o}C sıcaklık aralığındaki izotermal oksidasyon davranışını incelemek ve alaşımın yapısal özelliklerinin artan oksidasyon sıcaklıklarına bağlı olarak nasıl değiştiğini tespit etmektir.

2. Materyal ve Metot

Bu çalışmada, arc-melting yöntemi ile üretilen Cu-13Al-5Fe-2Co (ağırlıkça %) şekil hatırlamalı alaşımının 600 ^{o}C ile 900 ^{o}C sıcaklık aralığındaki izotermal oksidasyon davranışı TG/DTA (Perkin Elmer Pyris) sisteminde termo-gravimetrik analiz yöntemi kullanılarak incelendi. Oksijen gazı atmosferinde 600, 700, 800 ve 900 ^{o}C'de yaklaşık 75 dakika süreyle oksitlendirilecek olan alaşım numuneleri sırasıyla 2,73x2,29 mm, 2,42x2,89 mm, 3,01x3,6 mm ve 2,77x2,45 mm boyutlarında kesildi ve öncelikle basit bir zımparalama işlemiyle numune yüzeyleri düzeltildi. Daha sonra aseton çözücüsünde temizlenen numuneler TG/DTA fırını içerisine yerleştirildi ve saf azot gazı atmosferinde 50 ^{o}C/dk'lık ısıtma hızında çalışılan oksidasyon sıcaklıklarına kadar ısıtıldılar. TG/DTA fırınında çalışılan oksidasyon sıcaklıklarına ulaşıldıktan sonra ise numuneler 100 mL/dk'lık gaz akışına sahip saf oksijen gazı atmosferinde yaklaşık 75 dakika süreyle oksitlendirildiler. Her bir numune için sırayla gerçekleştirilen bu işlemlerin neticesinde, alaşım numunelerinin ilgili oksidasyon sıcaklıklarındaki zamana bağlı kütle kazancı eğrileri elde edildi. Farklı sıcaklıklarda oksidasyonları gerçekleştirilen alaşım numunelerin yapısal özelliklerinde meydana gelen değişimler, oda sıcaklığında $2\theta=30^{o}$-80^{o} aralığında Cu K_{α} radyasyonunun kullanıldığı X-ışını (Rigaku RadB-DMAX II) desenlerinin alınmasıyla incelendi.

3. Bulgular

Genel olarak metal ve alaşımların artan sıcaklıklara bağlı olarak oksidasyon davranışları incelendiğinde, bunların sergiledikleri oksidasyon davranışlarının lineer ve parabolik olmak üzere iki evreden oluştuğu görülmektedir [11,12]. Şekil 1 incelendiğinde, Cu-Al-Fe-Co alaşımının yaklaşık 100 ^{o}C ile 1000 ^{o}C sıcaklık aralığındaki oksidasyon davranışının parabolik olduğu anlaşılmaktadır. Bu nedenle, Cu-Al-Fe-Co alaşımının 600 ^{o}C ile 900 ^{o}C sıcaklık aralığındaki izotermal oksidasyon sabiti değerleri parabolik oksidasyon bağıntısı kullanılarak hesaplanacaktır.

Cu-Al-Fe-Co alaşımının 600, 700, 800 ve 900 ^{o}C'deki izotermal oksidasyon deneyleri neticesinde elde edilen kütle artış eğrileri şekil 2'de gösterilmektedir. Şekil 2'deki eğrilerden, her bir oksidasyon numunesinin zamana bağlı olarak sabit sıcaklıkta birim yüzey alanında meydana gelen kütle artışının parabolik olduğu net bir şekilde görülmektedir. Buradan, farklı sıcaklıklarda oksitlendirilen numunelerin parabolik izotermal oksidasyon sabitleri (K_p), aşağıda verilen denklem kullanılarak hesaplanmaktadır:

$$(\Delta W/A)^n = K_p t \quad (1)$$

Bu denklemde, $\Delta W/A$; numunenin birim yüzey alanında meydana gelen kütle artışı ve t; oksidasyon zamanıdır. Cu-Al-Fe-Co alaşımının oksidasyon davranışı yukarıda da belirttiğimiz gibi parabolik olduğu için, denklem 1'de n=2 alınmaktadır. Her bir numune için $(\Delta W/A)^2$-t eğrilerinin eğimlerinden oksitlendirilen alaşım numunelerinin K_p değerleri hesaplanmıştır. Sonuçlar tablo 1'de verilmektedir. K_p değerlerinin oksidasyon sıcaklıklarına bağlı değişimleri şekil 3'te gösterilmektedir. Tablo 1 ve şekil 3'ten, alaşımın oksidasyon hızının 700 ^{o}C'de kısmen azaldığı, 800 ^{o}C'de az oranda artış gösterdiği, bununla birlikte 900 ^{o}C'de ise dramatik bir artış sergilediği görülmektedir. Alaşımın 900 ^{o}C'deki oksidasyon hızı oldukça yüksektir. Bu durum aynı zamanda şekil 1'deki kütle artış eğrilerine bakılarak ta anlaşılabilinmektedir.

Tablo 1. Cu-Al-Fe-Co alaşımının 600-900 ^{o}C sıcaklık aralığındaki izotermal oksidasyon sabiti değerleri.

Sıcaklık (^{o}C)	K_p ($mg^2cm^{-4}s^{-1}$)
600	$3{,}5234 \times 10^{-4}$
700	$1{,}9428 \times 10^{-4}$
800	$6{,}77836 \times 10^{-4}$
900	$7{,}5 \times 10^{-3}$

Cu-Al-Fe-Co alaşımının 700 ^{o}C'deki kütle kazancının ve oksidasyon sabiti değerinin 600 ^{o}C'de oksitlendirilen numuneninkilerden daha düşük çıkmış olmasının sebebi; daha önce Cu-Al-Fe alaşımının benzer sıcaklıklarda gerçekleştirilen oksidasyon çalışmasına bakılarak daha iyi anlaşılabilinmektedir. Cu-Al-Fe alaşımının mikroyapısında bulunan Fe(Al,Cu) çökeltisinin 568,13 ^{o}C'deki çözünme reaksiyonunun neticesinde, bu alaşım 600 ^{o}C'de anormal oksidasyon davranışı sergilemiştir [13]. Yine daha önce yapılan bir diğer çalışmadan da bilinmektedir ki; Cu-Al-Fe-Co alaşımının mikroyapısı Fe(Al,Cu)-Co çökelti fazını ihtiva etmektedir [9].Ayrıca, Cu-Al-Fe-Co alaşımının Cu-Al-Fe alaşımı ile benzer faz dönüşümü karakteristikleri sergilediği burada gösterilmeyen DTA analizinden de bilinmektedir. Sonuç olarak, Cu-Al-Fe-Co alaşımının ^{o}600 C civarlarında sahip olduğu düşük entalpili endotermik reaksiyonun neticesinde alaşımın 600 ^{o}C'deki oksidasyon hızı 700 ^{o}C'dekinden çok fazla olmasa da yüksek çıkmıştır. Alaşımın DTA analizinden bu durum netleştirilmiştir.

Cu-Al-Fe-Co alaşımının oksidasyonu için aktivasyon enerjisi aşağıda verilen denklem ile hesaplanmıştır [14]:

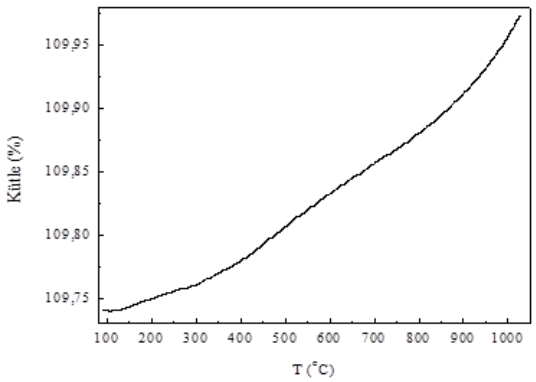
$$K_p = K_0 \exp(-E_0/RT) \quad (2)$$

Bu ifadede, K_0; üstel sabit, T; oksidasyon sıcaklığı ve R; gaz sabitidir. Denklem 2'de her iki tarafın doğal logaritması alınırsa;

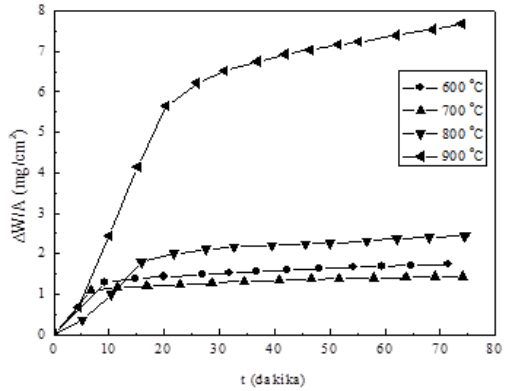
$$\ln K_p = \ln K_0 - E_0/RT \quad (3)$$

ifadesi elde edilir. Buradan $\ln K_p$-1000/T grafiği çizilirse E_0 değeri hesaplana bilinmektedir. Şekil 4'te Cu-Al-Fe-Co alaşımının çalışılan oksidasyon sıcaklıkları için çizilen $\ln K_p$-1000/T grafiği gösterilmektedir. Grafiğin eğiminden, Cu-Al-Fe-Co alaşımı için oksidasyon aktivasyon enerjisi E_0=83,0657 kj/mol olarak hesaplanmıştır. Kök ve Yildiz [14], CuAlNiFe alaşımı için oksidasyon aktivasyon enerjisini 58,66 kj/mol olarak bulmuşlardı. Bu alaşım ile Cu-Al-Fe-Co alaşımının E_0 değerleri karşılaştırıldığında, Cu-Al-Fe-Co alaşımı için oksidasyon aktivasyon enerjisinin daha yüksek olduğu görülmektedir. Bunun sebebi olarak, Cu-Al-Fe-Co alaşımındaki Co elementinin varlığı düşünülmektedir. Çünkü Co elementi yüksek oksidasyon hızına sahiptir. Cu-13Al-5Fe-2Co şekil hatırlamalı alaşımının 600-900 ^{o}C aralığındaki izotermal oksidasyon deneyleri neticesinde, alaşım numunelerinin oksidasyona bağlı olarak faz bileşenlerinde meydana gelen

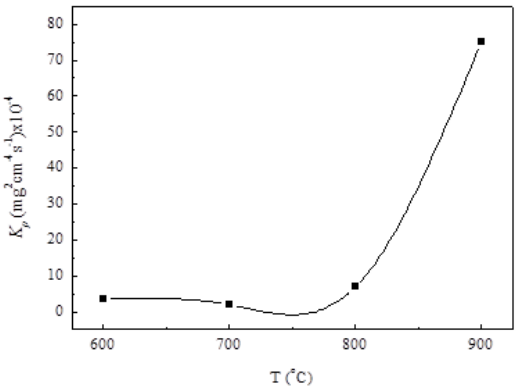
değişimler Şekil 5'te gösterilen X-ışını desenlerinin alınmasıyla incelendi.



Şekil 1. Cu-Al-Fe-Co alaşımının izotermal olmayan TG/DTA eğrisi.

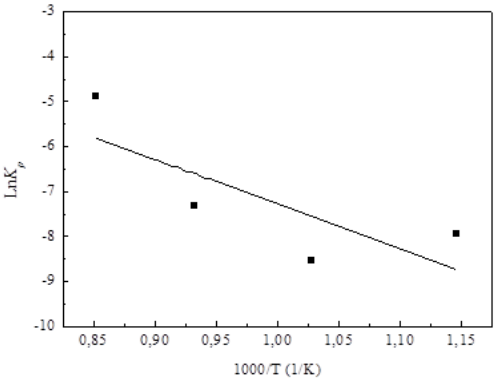


Şekil 2. 600, 700, 800 ve 900 °C'de yaklaşık 75 dakika süreyle oksitlendirilen numunelerinin kütle artış eğrileri.

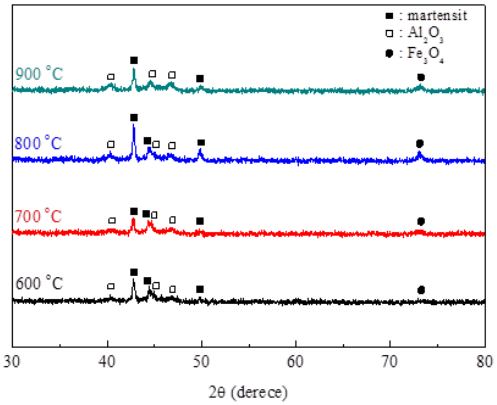


Şekil 3. Cu-Al-Fe-Co alaşımının oksidasyon sabitlerinin artan oksidasyon sıcaklıklarına bağlı olarak değişimi.

600 °C'de oksitlendirilen alaşım numunesinin X-ışını deseni incelendiğinde, alaşımın bu sıcaklıkta gerçekleştirilen oksidasyonu sonucu faz yapısının 3 farklı faz bileşeninden oluştuğu görülür: ana martensit faz, Al_2O_3 ve Fe_3O_4 oksit fazları. Şekil 5'teki 700, 800 ve 900 °C'de oksidasyonları gerçekleştirilen diğer alaşım numunelerinin X-ışını desenlerine bakıldığında ise, bu numunelerin X-ışını desenlerindeki piklerin de 600 °C'de oksitlendirilen alaşım numunesinin X-ışını desenindeki pikler ile özdeş oldukları görülmektedir.



Şekil 4. Cu-Al-Fe-Co şekil hatırlamalı alaşımı için oksidasyon aktivasyon enerjisi grafiği



Şekil 5. 600, 700, 800 ve 900 °C'de oksitlendirilen alaşım numunelerinin X-ışını desenleri

Sonuç olarak, farklı sıcaklıklarda oksitlendirilen tüm alaşım numuneleri aynı faz bileşenlerine sahiptirler (martensit + Al_2O_3 + Fe_3O_4) ve yalnızca oksidasyon sıcaklıklarına bağlı olarak özellikle oksit fazlara ait piklerin şiddetlerinde değişimler meydana gelmiştir. Bu da iyi bilindiği üzere oksit fazların miktarlarıyla doğrudan alakalıdır. Örneğin, 600 °C'de oksitlendirilen numunenin X-ışını desenindeki Al_2O_3 fazına ait piklerin şiddetlerinin, 700 °C'de

oksitlendirilen numunenin X-ışını desenindekiler ile karşılaştırıldığında daha yüksek oldukları görülmektedir. Bu sonuç, Şekil 2 ve 3'te elde edilen sonuçlar ile uyum içerisindedir ve buradan 600 ^{o}C'de oksitlendirilen numunenin içerdiği oksit faz (Al_2O_3) miktarının, 700 ^{o}C'de oksitlendirilen numunenin içerdiği oksit faz (Al_2O_3) miktarından daha fazla olduğu net bir şekilde anlaşılmaktadır. 800 ve 900 ^{o}C'de oksitlendirilen numunelerin X-ışını desenleri incelendiğinde ise, Al_2O_3 oksit fazına ait piklerin şiddetlerinin beklenildiği gibi iyice arttığı görülmektedir. Buraya kadar alaşım numunelerinin oksidasyonlarına ilişkin kütle artış eğrileri (Şekil 2) ile birlikte Fe_3O_4 oksit fazına nazaran özellikle Al_2O_3 oksit fazına ait piklerin şiddetlerinin mukayese edilmesinin sebebi ise; yapılmış olan çalışmalardan, Cu-Al-bazlı şekil hatırlamalı alaşım sistemlerinin oksidasyonlarında baskın oksit fazın Al_2O_3 oksit fazı olmasının iyi bilinmesidir [13,14].

4. Sonuçlar

Yüksek-sıcaklık Cu-13Al-5Fe-2Co (ağırlıkça %) şekil hatırlamalı alaşımının 600 ^{o}C ile 900 ^{o}C aralığındaki sıcaklıklarda izotermal oksidasyon davranışının incelendiği bu çalışmada aşağıda özetlenen sonuçlar elde edilmiştir:

- İzotermal olmayan termo-gravimetrik analiz, Cu-Al-Fe-Co alaşımının 600-900 ^{o}C aralığındaki oksidasyon davranışının parabolik oksidasyon kuralına uyduğunu gösterdi.
- 600, 700, 800 ve 900 ^{o}C'de gerçekleştirilen izotermal oksidasyon deneylerinden, Cu-Al-Fe-Co alaşımının 700 ^{o}C'deki oksidasyonunun hem termo-gravimetrik analizlerden hemde hesaplanan K_p değerlerinden 600 ^{o}C'dekine göre daha düşük olduğu tespit edildi. Bu durumun Cu-Al-Fe-Co alaşımının yaklaşık 600 ^{o}C civarlarında sahip olduğu endotermik çökelti çözünme reaksiyonu ile ilişkili olduğu varsayıldı.
- Cu-Al-Fe-Co alaşımı için oksidasyon aktivasyon enerjisi E_0=83,0657 kj/mol olarak hesaplandı ve bu değerin literatürdeki özellikle Cu-Al-bazlı şekil hatırlamalı alaşımların oksidasyonu için gerekli aktivasyon enerjisi değerlerinden daha yüksek olduğu görüldü.
- X-ışını analizleri, Cu-Al-Fe-Co alaşımının yapısal özelliklerinin farklı sıcaklıklarda gerçekleştirilen izotermal oksidasyon deneyleri ile değiştiğini gösterdi. Bununla birlikte, farklı sıcaklıklarda oksitlendirilen tüm alaşım numunelerinin aynı faz bileşenlerine (martensit+Al_2O_3+Fe_3O_4) sahip oldukları ve termo-gravimetrik analizlerle uyumlu bir şekilde yalnızca oksit fazların şiddetlerinin, yani miktarlarının değiştiği gözlemlendi.

5. Kaynaklar

1. Saud, S.N., Hamzah, E., Abubakar, T. and Farahany, S., (2014). Structure-property relationship of Cu-Al-Ni-Fe shape memory alloys in different quenching media, Jurnal of Materials Engineering and Performance, 23, 255-261.

2. Adorno, A.T. and Silva R.A.G., (2006). Effect of Ag additions on the reverse martensitic transformation in the Cu-10 mass% Al alloy, Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 83, 241-246.

3. Ma, Y., Jiang, C., Deng, L. and Xu, H., (2003). Effects of composition and thermal cycle on transformation behaviors, thermal stability and mechanical properties of CuAlAg alloy, Journal of Materials Science and Technology, 19, 431-434.

4. Hurtado, I., Ratchev, P., Van Humbeck, J. and Delaey, L., (1996). A fundamental study of the X-phase precipitation in Cu-Al-Ni-Ti-(Mn) shape memory alloys, Acta Materialia 44, 3299-3306.

5. Gama, J.L.L., Dantas, C.C., Quadros, N.F., Ferreira, R.A.S. and Yadava, Y.P., (2006). Microstructure-mechanical property relationship to copper alloys with shape memory during thermomechanical treatments, Meallurgical and Materials Transactions, 37A, 77-87.

6. Raju, T.N. and Sampath, V., (2011). Influence of aluminium and iron contents on the transformation temperatures of Cu-Al-Fe shape memory alloys, Transactions of The Indian Institute of Metals, 64, 165-168.

7. Raju, T.N. and Sampath, V., (2011). Effect of ternary addition of iron on shape memory characteristics of Cu-Al alloys, Jurnal of Materials Engineering and Performance, 20, 767-770.

8. Yang, S., Su, Y., Wang, C. and Liu, X., (2014). Microstructure and properties of Cu-Al-Fe high-temperature shape memory alloys, Materials Science and Engineering B, 185, 67-73.

9. Yildiz, K., Kök, M. and Dağdelen, F., (2015). Cobalt addition effects on martensitic transformation and microstructural properties of high-temperature Cu-Al-Fe shape-memory alloys, Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 120, 1227-1232.

10. Wang, C.P., Su, Y., Yang S.Y., Shi, Z. and Liu X.J., (2014). A new type of Cu-Al-Ta shape memory alloy with high martensitic transformation temperature, Smart Materials and Structures, 23, 025018 (7pp).

11. Kök, M., Pirge, G. and Aydoğdu, Y., (2013). Isothermal oxidation study on NiMnGa ferromagnetic shape memory alloy at 600-1000 ^{o}C, Applied Surface Science, 268, 136-140.

12. Dagdelen, F. and Ercan, E., (2014). The surface oxidation behavior of Ni-45.16%Ti shape memory alloys at different temperatures, Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 115, 561-565.

13. Yildiz, K., (2016). Oxidation of high-temperature Cu-Al-Fe shape memory alloy, Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 123, 409-412.

14. Kök, M. and Yildiz, K., (2014). Oxidation parameters determination of Cu-Al-Ni-Fe shape-memory alloy at high temperatures, Applied Physics A, 116, 2045-2050..