
Araştırma Makalesi / Research Article

Ti-27Ni-20Nb-3V Alaşımın Faz Dönüşüm Sıcaklıkları, Korozyon Direnci ve Yapısal Özelliklerinin İncelenmesi

Fethi DAĞDELEN¹, Esra BALCI¹, Ercan ERCAN^{2*},

¹Fırat Üniversitesi, Fen Fakültesi, Fizik Bölümü, Elazığ

²Bitlis Eren Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü, Bitlis

(ORCID: 0000-0001-9849-590X) (ORCID: 0000-0003-0127-7602) (ORCID: 0000-0002-1583-6068)

Öz

Bu çalışmada Ti-27Ni-20Nb-3V (% at.) alaşımı ark-ergitme yöntemi ile üretildi. Üretilen alaşım 850 °C de 24 saat homojenleştirildikten sonra, faz dönüşüm sıcaklıkları, mikro-yapısı, elektrokimyasal aşınma direnci, mikrosertlik gibi fiziksel ve kimyasal özellikleri araştırıldı. DSC yardımıyla faz dönüşüm sıcaklıkları austenite-martensite faz geçişlerinin oda sıcaklığının altında olduğu belirlendi. Optik mikroskop (OM) ve SEM görüntülerinde alaşımın Ti-elementince zengin dendritik yapılarından oluştuğu görüldü. XRD patternlerinden ise β -Nb, B2 ve B19' yapılarının da olduğu belirlendi. Ayrıca, yapılan hesaplamalar sonucu kristalit tane boyutu yaklaşık 39,65 nm olarak hesaplandı. Oda sıcaklığında yapay vücut sıvısı (SBF)'de yapılan elektrokimyasal analizi sonucu korozyon direnci $8,09 \times 10^{-5}$ mmpy olarak hesaplandı. Mikrosertlik ölçümleri ile alaşımın mikrosertliği beş ayrı bölgeden alınarak ortalama 810 HV olarak bulundu.

Anahtar kelimeler: Şekil hatırlamalı alaşımlar; korozyon direnci; mikrosertlik

Investigation of Phase Transformation Temperature, Corrosion Resistance and Structural Properties of Ti-27Ni-20Nb-3V Shape Memory Alloy

Abstract

In this study Ti-27Ni-20Nb-3V (% at.) alloy was produced by arc-melting method. Physical and chemical properties such as phase transformation temperatures, micro-structure, electro chemical wear resistance, microhardness of the alloy homogenized at 850 °C for 24 hours were investigated. Phase transformation temperatures were determined with the help of DSC that austenite-martensite phase transitions were below room temperature. Optical microscope (OM) and SEM images showed that the alloy consisted of Ti-rich dendritic structures. β -Nb, B2 and B19' were found in XRD patterns. In addition, as a result of the calculations, the crystallite particle size was calculated as approximately 39,65 nm. Corrosion resistance was calculated as $8,09 \times 10^{-5}$ mmpy as a result of electrochemical analysis performed in SBF (artificial body fluid) at room temperature. The microhardness measurements of the alloys were taken from five different regions and found to be 810 HV on average.

Keywords: Shape memory alloy; corrosion resistance; microhardness

1. Giriş

Plastik deforme olmuş malzemenin (alaşımın) ısı, termo-mekanik veya manyetik yük uygulanarak orijinal şekline geri dönme yeteneği şekil hatırlama olarak tanımlanır [1-3]. Alaşımlar içerisinde Şekil Hatırlamalı Alaşım (ŞHA) özelliği sergileyen NiTi alaşımları mükemmel Şekil Hatırlama Etkisi (ŞHE), süper-esneklik ve biyouyumluluklarından dolayı önem kazanmaktadır. Günümüzde ŞHA'ların ticari uygulamalarının %90'nını ikili NiTi ya da üçlü NiTiNb, NiTiTa, NiTiCu gibi alaşımlar almaktadır [4]. NiTi-esaslı alaşımlar son zamanlarda medikal implant, uzay mühendisliği ve endüstriyel alanlarda geniş yer almaktadır [5]. Ayrıca, NiTi ŞHA'ların iyi aşınma, korozyon direnci ve biyouyumluluk özellikleri

*Sorumlu yazar: eercan@beu.edu.tr

Geliş Tarihi: 29.03.2021, Kabul Tarih: 02.06.2021

neniyle cerrahi aletler, stent ve ortodontik teller gibi çeşitli tıbbi uygulamalar için cazip duruma getirmektedir [4, 6]. NiTi alaşımlarının uygulanabilir sertliği kemik implantı ve regeneratif tıp alanında ilgi odağıdır. Son zamanlarda araştırmalar NiTiNb, NiTiTa, NiTiHf gibi üçlü alaşımların yanısıra, NiTiNbX (X=V, Ta, Hf) gibi dördümlü şekil hatırlamalı alaşımlar üzerinde odaklanmıştır. F. Dağdelen ve arkadaşlarının yaptığı bir çalışmada (2019) NiTi alaşımına farklı oranlarda Ta eklenmesiyle dönüşüm sıcaklıklarının fazla etkilenmediği, alaşımların kristal yapısında sıklıkla rastlanan B2 (Austenite) ve B19' (Martensite) fazlarının yanısıra β -Ta fazına rastlanıldığı ve mikrosertliklerinin yaklaşık olarak 470 HV olduğunu belirlemişlerdir [7]. S. Buytoz ve arkadaşların yaptığı bir çalışmada (2019) ise NiTi alaşımına ilave edilen Hf elementi ile dönüşüm sıcaklıklarının dönüşüm entalpilerini büyük ölçüde etkilediği ve alaşımda Hf elementinin oranının artması ile tane büyüklüklerinin arttırdığı belirlendi [8]. Başka bir çalışmada F. Dağdelen ve arkadaşları (2020) NiTi alaşımına farklı atomik oranlarda Nb katkılmış, Nb oranının artmasıyla alaşımların martensit fazın oda sıcaklığının altında, austenit fazın ise oda sıcaklığının yakınında olduğu belirlenmiştir [9]. E. Balcı ve arkadaşlarının NiTiNbV dördümlü ŞHA üzerine yaptıkları bir çalışmada (2021) ise V oranının artmasıyla faz dönüşüm entalpisi, entropi, Gibbs serbest enerjisi gibi termodinamik parametrelerini değiştirdiği ve korozyon direncini arttırdığı belirlendi [10]. Üçlü NiTiNb ŞHA'lar üzerine birkaç araştırma olmasına karşı, dördümlü NiTiNbV alaşımı üzerine araştırmalar yok denecek kadar azdır.

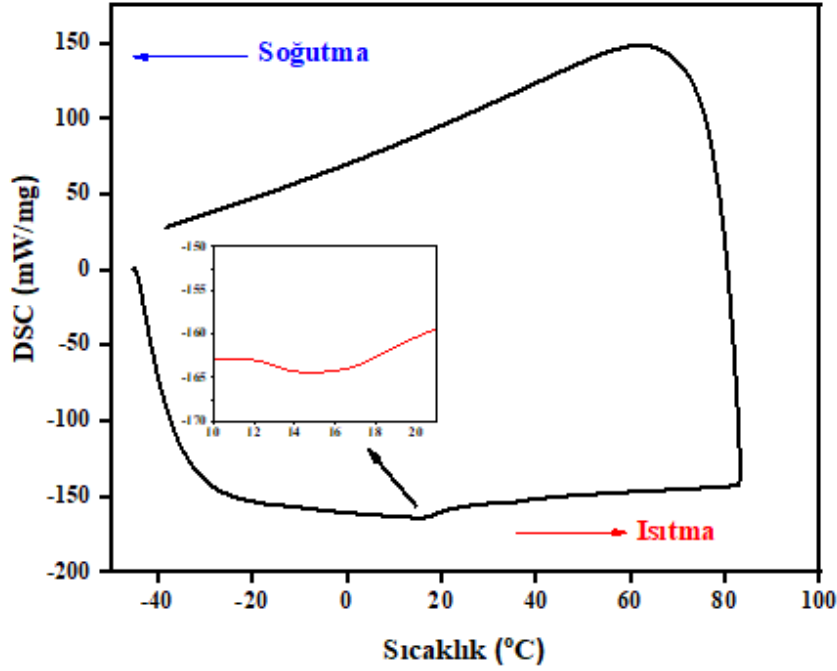
Bu çalışmada NiTiNbV alaşımı ark ergitme yöntemi ile üretildi. Alaşımların faz dönüşüm sıcaklıkları, mikroyapısı, korozyon direnci, mikrosertlik gibi fiziksel ve kimyasal özellikleri araştırıldı.

2. Materyal ve Metot

Bu çalışmada araştırılan Ni-50Ti-20Nb-3V (% atomik) alaşımı % 99,9 saflıkta Merk marka - 325 mesh metal tozlarından karıştırılarak ark-ergitme yöntemiyle üretildi. Alaşımı homojenleştirilmek için kül fırını ortamına argon gazı verilerek 850 °C de 24 saat süreyle bekletilip ardından tuzlu-buzlu suda soğutuldu. Alaşımların fiziksel ve kimyasal özelliklerini araştırmak için DSC (Differential Scanning Calorimeter), XRD (X-ışını difraksiyonu), OM (Optik mikroskop), SEM (Scanning Elektron Mikroskop), Mikrosertlik ve Elektrokimyasal karakterizasyonları araştırıldı. Faz dönüşüm sıcaklıklarını belirlemek için Perkin Elmer Sapphire marka DSC cihazı ile 10 °C/dak. ısıtma ↔ soğutma hızıyla azot gazı atmosferinde ısı akısı ölçümleri yapıldı. Alaşımların X-ışını analizleri Bruker Discover D8 X-ray diffraction (XRD) cihazı (CuK_{α} $\lambda=1,5418$) kullanılarak 30-80° arasında 2 °/dak. sabit tarama hızı ile oda sıcaklığında yapıldı. Optik mikroskop ölçümleri alınacak olan alaşımlar soğuk bakalite alınıp, METKON FORCIPOL-2 Zımparalama ve Parlatma Cihazında sırasıyla 240, 400, 600, 800, 1000, 1200 ve 2000 mesh zımpara kâğıtları kullanılarak zımparalandı. Çuha ve elmas pasta kullanılarak yüzeyleri parlatılan numuneler, NOH₃(5%) + HF(10%) + H₂O (85%) oranlarında hazırlanan dağlayıcı yardımıyla yaklaşık 10 saniye süreyle dağlandı. Saf su ve alkol ile yüzeyleri temizlenip kurutulmuş numuneler NIKON MA100 Ters Metal Mikroskopu cihazı ile metalografik gözlemleri yapıldı. Ardından Jeol JSM 7001F SEM-EDX cihazı kullanılarak yüzey analizleri yapıldı. Alaşımların Vickers sertlik ölçümleri beş farklı bölgeden alınarak ortalaması değerlendirildi. Alaşımların korozyon davranışı yapay vücut sıvısında Gamry Interface Potentiostat/Galvanostat/ZRA kullanılarak oda sıcaklığında incelendi.

3. Bulgular ve Tartışma

NiTi alaşımları düşük sıcaklıklarda martensit faz (B19') ve yüksek sıcaklıklarda ise austenite faz (B2) dönüşümü sergileyen alaşımlardır. Vanadyum katkılanmış NiTiNb şekil hatırlamalı alaşımların 10 °C/dak ısıtma-soğutma hızıyla elde edilen DSC eğrisi Şekil 1'de verildi. NiTiNb-3V alaşımlarının DSC eğrisi incelendiğinde, alaşımların B19'→B2 faz geçişinde A_s (Austenite başlama) =12 °C, A_f (Austenite bitiş) =20 °C'de gerçekleştiği belirlendi. Belirlenen bu sonuç E. Balcı ve arkadaşlarının (2021) üretmiş olduğu Ni-50Ti-22Nb-1V, Ni-50Ti-20Nb-2V ve Ni-50Ti-18Nb-5V alaşımlarının sergilediği austenit faz sıcaklıklarına yakındır [10]. Alaşımların B2→B19' faz dönüşümü ölçülen sıcaklık aralığında belirgin değildir. Bu yarı-kararlı Ti-esaslı alaşımlarda süper-esneklik ve şekil hafıza özelliklerinin ana β (düzensiz bcc) fazının geri dönüşümlü termoelastik martensit dönüşüm ile α'' (altıgen martensit) veya α (ortorombik martensit) fazına dönüştürülmesi olayına dayandığı bilinmektedir [11, 12]. Bu faz dönüşümlerinin zor-zorlanma analizleri ile daha belirgin bir şekilde görüldüğü yapılan çalışmalarda mevcuttur [13].



Şekil 1. NiTiNbV alaşımın 10 °C/dak ısıtma-soğutma hızıyla alınan DSC grafiği

Şekil 2' de NiTiNbV alaşımın oda sıcaklığında alınan XRD difraktogramı verildi. XRD analiz sonuçları değerlendirildiğinde NiTi şekil hatırlamalı alaşımlarında sıklıkla gözlenen B19', B2 fazlarının yanı sıra β -Nb (Niyobyumca zengin faz), Ti_2Ni ve (Ti,Nb) çökelti fazları tespit edildi [14]. E. Balcı ve arkadaşlarının yapmış olduğu bir çalışmada $Ni_{27}Ti_{50}Nb_{23-x}V_x$ ($x=1,2$ ve 5) şekil hatırlamalı alaşımının XRD analizi sonuçlarına benzer fazlar tespit edilmiştir. [10]. M. Kök ve arkadaşlarının yapmış olduğu farklı bir çalışmada ise $Ni_{48}Ti_{51}V_1$ ve $Ni_{48}T_{47}V_5$ yüksek sıcaklık ŞHA'larda XRD analizlerinde aynı fazlara rastlamıştır [15]. F. Dağdelen ve arkadaşlarının (2018) NiTi esaslı alaşıma Ta elementi ilavesinin etkilerini incelemiş, XRD sonuçlarında B2, B19' fazının yanısıra yaklaşık $2\theta=39^\circ$ de β -Ta pikine rastlamışlardır [5]. Şekil hatırlamalı alaşımların nano boyutta kristalit tane boyutlarını hesaplamak için Debye Scherrer denklemi kullanılabilir. Bu denklem ile elde edilen hesaplamalar sonucu kristal tane boyutunun yaklaşık değeri 39,65 nm bulunmuştur. Literatürde mevcut olan bir çalışmada, M. Kök ve arkadaşları (2020) NiTi esaslı V elementi katkılı Ş:HA'ların kristal tane boyutunu ortalama 370 Å (37 nm) hesaplamıştır [15].

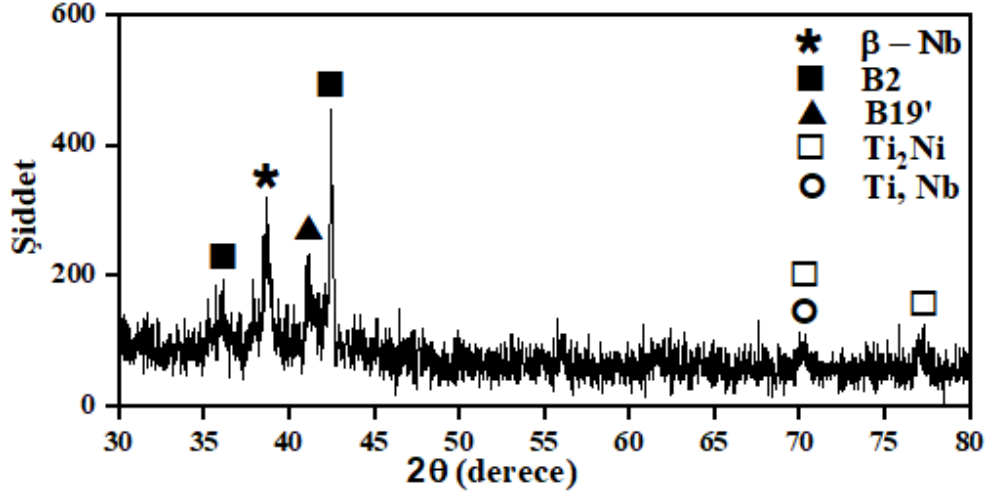
XRD sonucu, alaşımların kristalit boyutu (D) gibi kristal yapı parametreleri hakkında daha fazla bilgi verir. Scherrer'in modeli, yarı maksimumda tam genişliğe ($FWHM (B)$), aşağıdaki gibi ifade edilebilir [16-19];

$$D = K\lambda/B \cos \theta \quad (1)$$

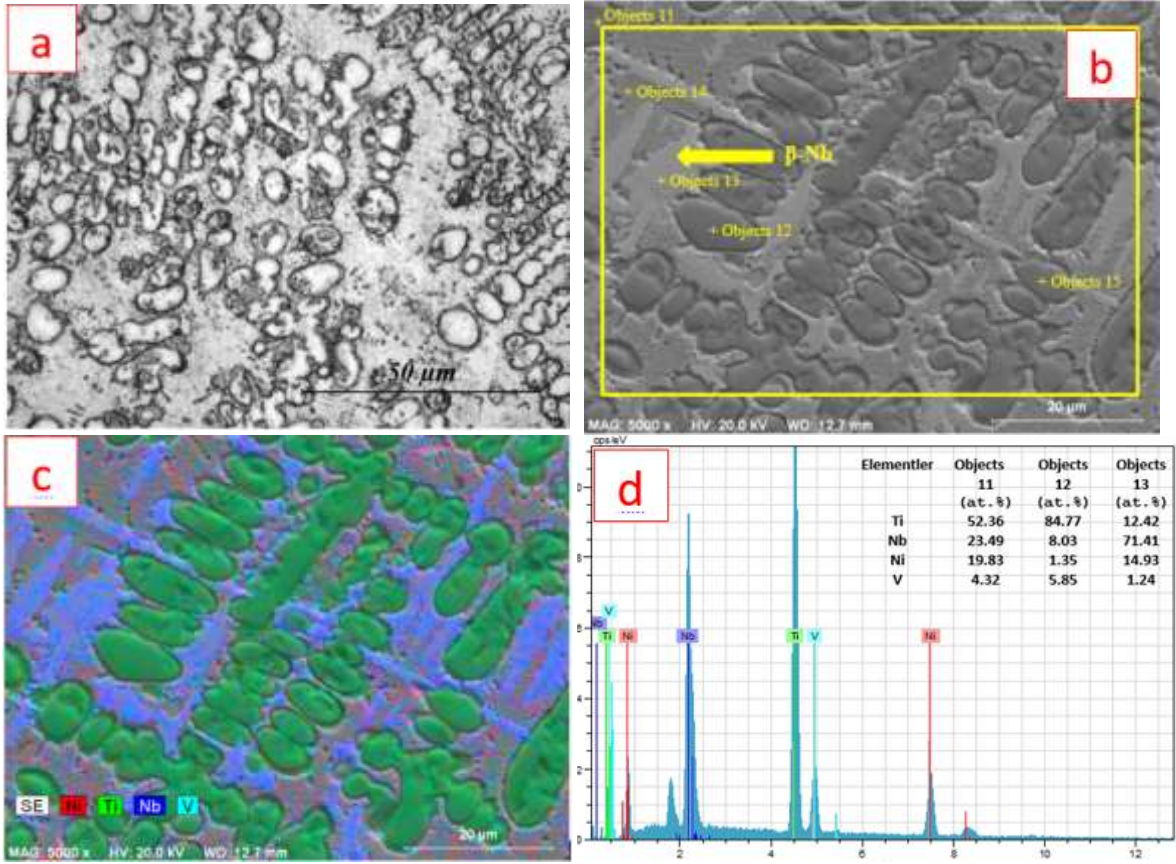
burada K , Scherrer sabitidir, en iyi yaklaşım değeri 0.9'dur [20]. λ , kullanılan x-ışını kaynağının dalga boyudur ($\lambda_{K\alpha} (Cu) = 1.5406\text{Å}$) ve B Bragg açısını temsil eder.

NiTiNbV alaşımının OM ve SEM-EDX görüntüleri Şekil 3'de verildi. Şekil 3a-b incelendiğinde alaşımın dendritik yapılardan oluştuğu söylenilebilir. Yapı içinde taneler ve martensit plakaları görülmemiştir. Fakat ana matris yapıda β -Nb yapısı EDX sonuçlarından tespit edildi. Şekil 3c alaşımın haritalanmış SEM görüntüsü incelendiğinde Ni elementinin yapı içinde homojen dağıldığı görüldü. Dendrit kollarının ise verilen EDX (*objects 12*) sonuçlarında görüldüğü gibi Ti (84.77 at. %) bakımından zengin olduğu belirlenmiştir. SEM görüntüsünün tüm yüzeyinden (*objects 11*) alınan EDX sonuçları (Şekil 3d) hedeflen NiTiNbV alaşımının atomik oranıyla uyumludur. Nb katkılı NiTi alaşımlarında sıklıkla rastlanan β -Nb (Niyobyumca zengin) fazı yapı içinde mevcuttur (*objects 13*). SEM-EDX sonuçları ile XRD sonuçları birbirini desteklemektedir. Alaşımın mikrosertlik testi Vickers sertik ölçüm yöntemiyle yapılmış olup, beş ayrı bölgeden alınarak ortalama 810 HV olarak bulundu. I. N. Qader ve arkadaşlarının yaptığı bir çalışmada (2020), farklı oranlarda Sn katkılanan NiTiSn alaşımının

mikrosertlik sonucu yaklaşık 180-455 HV aralığında değiştiği belirlenmiştir [21]. C. Tatar ve arkadaşlarının yaptığı bir çalışmada (2020) NiTiCu şekil hatırlamalı alaşımın mikrosertlik ölçüm sonucunu yaklaşık 200- 500 HV arasında bulmuştur [22].



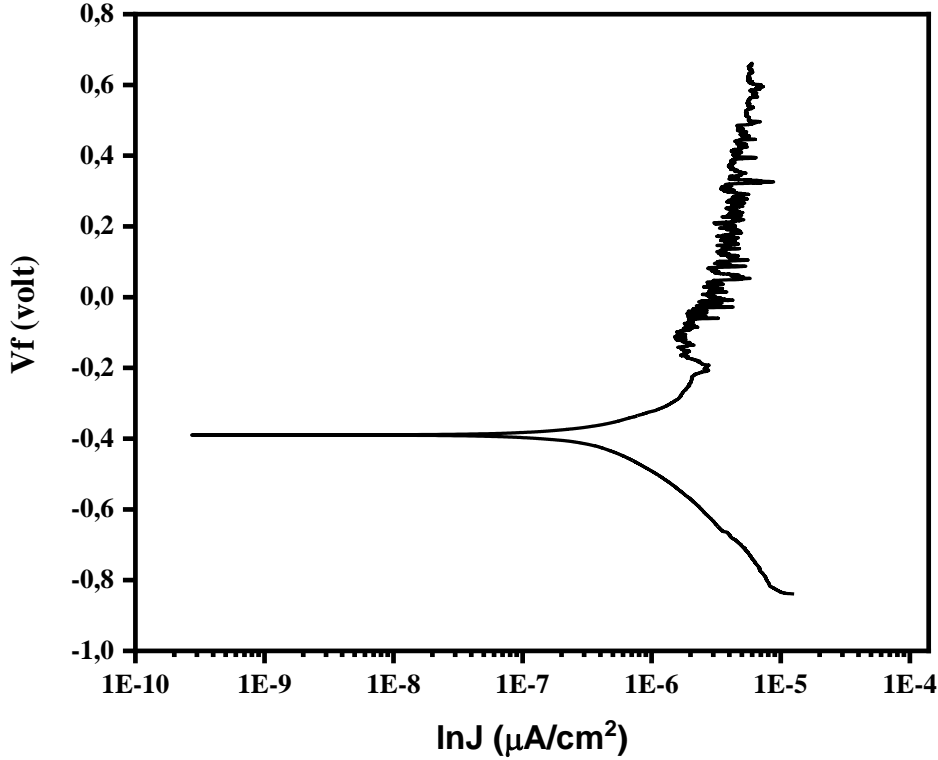
Şekil 2. Alaşımın oda sıcaklığında alınan X-ışınları difraktogramı



Şekil 3. Alaşımın OM ve SEM-EDX sonuçları a) OM, b) SEM, c) SEM haritalama, d) EDX sonuçları.

Alaşımın korozyon davranışını analiz etmek için oda sıcaklığında yapay vücut sıvısı içerisinde elektrokimyasal test yapıldı. Korozyon oranı alaşımın yapısına ve yüzey davranışına bağlı olarak değişik sonuçlar gösterebilir. Polarizasyon taraması sonucunda Şekil 4 ' de alaşımın Tafel eğrisi verildi. Anodik (β_a) ve Katodik (β_c) polarizasyon için Tafel eğimleri teğetsel yöntem kullanılarak belirlendi. Anodik ve katodik polarizasyonda kesişme noktasının ekstrapolasyonundan korozyon akım yoğunluğu (J_{cor}) ve korozyon gerilimi (E_{cor}) bulunmuştur. $8,09 \times 10^{-5}$ mmpy olarak bulunan bu değer korozyon oranını

tespit etmekte kullanılmaktadır. Korozyon oranı yüksek bir dereceye sahip olan bu alaşım literatürde var olan diğer alaşımlara göre oldukça yüksek sonuca sahiptir [23-25]. Bu sonuç alaşımın oda sıcaklığında ve vücut sıvısında korozyona çok dirençli olduğunu gösterir. E. Balcı ve arkadaşlarının (2021) yapmış olduğu bir çalışmada farklı oranlarda NiTiNbV dördü ŞHA'ların ortalama korozyon oranı yaklaşık 1.70×10^{-2} mmpy olarak hesaplanmıştır [10]. Bu sonuç ise ortalama bir yılda yapay vücut sıvısı ile malzemenin reaksiyona girme olasılığının düşük olduğunu göstermektedir.



Şekil 4. Alaşımın oda sıcaklığında yapay vücut sıvısında elde edilen Tafel eğrisi

4. Sonuç ve Öneriler

Çalışmada dördü Ni-50Ti-20Nb-3V alaşımın dönüşüm sıcaklıklarından austenit fazın oda sıcaklığının (12-20°) altında B19'→B2 faz geçişi şeklinde olduğu belirlenmiştir. Martensit faz dönüşüm sıcaklıklarının ise DSC analizinden -40°C'nin altında olabileceği tahmin edilmektedir. XRD ve SEM-EDX sonuçlarından alaşımın mikroyapısında β -Nb fazının yanı sıra B2 ve B19' fazlarının var olduğu görülmüştür. Mikrosertliğin geleneksel NiTi alaşımlarına göre yüksek çıkması, Nb ve V element ilavesi ile birlikte alaşımın 850 °C de 24 saat ısıl işlem uygulanmasına da atfedilmiştir. Mikrosertliğin yüksek olması korozyon direncini de artırmıştır. Nitekim oda sıcaklığında yapay vücut sıvısında yapılan elektrokimyasal testinde korozyonun direncinin yüksek olduğu belirlenmiştir.

Yazarların Katkısı

Yazarların makaleye olan katkıları eşit orandadır.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Kaynaklar

- [1] Stöckel D. 1995. The shape memory effect-phenomenon, alloys and applications. *Proceedings: Shape Memory Alloys for Power Systems EPRI*, 1: 1-13.
- [2] Sathiya P., Ramesh T. 2017. Experimental investigation and characterization of laser welded NiTiInol shape memory alloys. *Journal of Manufacturing Processes*, 25: 253-261.
- [3] Jani J. M., Leary M., Subic A., Gibson M. A. 2014. A review of shape memory alloy research, applications and opportunities. *Materials & Design (1980-2015)*, 56: 1078-1113.
- [4] Elahinia M. H., Hashemi M., Tabesh M., Bhaduri S. B. 2012. Manufacturing and processing of NiTi implants: a review. *Progress in Materials Science*, 57 (5): 911-946.
- [5] Dağdelen F., Aydogdu Y. 2019. Transformation behavior in NiTi–20Ta and NiTi–20Nb SMAs. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 136 (2): 637-642.
- [6] Tabesh M. 2010. Finite element analysis of shape memory alloy biomedical devices: University of Toledo.
- [7] Dağdelen F., Kok M., Qader I. 2019. Effects of Ta content on thermodynamic properties and transformation temperatures of shape memory NiTi alloy. *Metals and Materials International*, 25 (6): 1420-1427.
- [8] Buytoz S., Dağdelen F., Qader I., Kok M., Tanyildizi B. 2019. Microstructure Analysis and Thermal Characteristics of NiTiHf Shape Memory Alloy with Different Composition. *Metals and Materials International*, 1-12. doi:<https://doi.org/10.1007/s12540-019-00444-7>.
- [9] Dağdelen F., Balci E., Qader I., Ozen E., Kok M., Kanca M., Abdullah S., Mohammed S. 2020. Influence of the Nb content on the microstructure and phase transformation properties of NiTiNb shape memory alloys. *JOM Journal of the Minerals Metals and Materials Society*, 72 (4): 1664-1672.
- [10] Balci E., Dağdelen F., Qader I.N., Kok M. 2021. Effects of substituting Nb with V on thermal analysis and biocompatibility assessment of quaternary NiTiNbV SMA. *The European Physical Journal Plus*, 136 (2): 1-13.
- [11] Kim H., Sasaki T., Okutsu K., Kim J., Inamura T., Hosoda H., Miyazaki S. 2006. Texture and shape memory behavior of Ti–22Nb–6Ta alloy. *Acta Materialia*, 54 (2): 423-433.
- [12] Ercan E., Dağdelen F. 2020. TiNb-esaslı β -Ti Alaşımlarının Kristal Yapı, Mikroyapı ve Dönüşüm Sıcaklıklarına Tantal Katkısının Etkileri. *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 9 (4): 1545-1553.
- [13] Dubinskiy S., Brailovski V., Prokoshkin S., Pushin V., Inaekyan K., Sheremetyev V., Petrzhik M., Filonov M. 2013. Structure and properties of Ti-19.7 Nb-5.8 Ta shape memory alloy subjected to thermomechanical processing including aging. *Journal of materials engineering and performance*, 22 (9): 2656-2664.
- [14] Zhang C., Wang Y., Chai W., Zhao L. 1991. The study of constitutional phases in a Ni₄₇Ti₄₄Nb₉ shape memory alloy. *Materials Chemistry and Physics*, 28 (1): 43-50.
- [15] Kök M., Al-Jaf A.O.A., Çirak Z.D., Qader I.N., Özen E. 2020. Effects of heat treatment temperatures on phase transformation, thermodynamical parameters, crystal microstructure, and electrical resistivity of NiTiV shape memory alloy. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 139 (6): 3405-3413.
- [16] Patterson A.L. 1939. The Scherrer Formula for X-Ray Particle Size Determination. *Physical Review*, 56 (10): 978-982.
- [17] Kök M., Qader I.N., Mohammed S.S., Öner E., Dağdelen F., Aydogdu Y. 2019. Thermal stability and some thermodynamics analysis of heat treated quaternary CuAlNiTa shape memory alloy. *Materials Research Express*, 7 (1): 015702. doi:[10.1088/2053-1591/ab5bef](https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab5bef).
- [18] Mohammed S.S., Kok M., Qader I.N., Kanca M.S., Ercan E., Dağdelen F., Aydoğdu Y. 2020. Influence of Ta Additive into Cu_{84-x}Al₁₃Ni₃ (wt%) Shape Memory Alloy Produced by Induction Melting. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions A: Science*, 44 (4): 1167-1175.
- [19] Qader I.N., Ercan E., Faraj B.A.M., Kok M., Dağdelen F., Aydogdu Y. 2020. The Influence of Time-Dependent Aging Process on the Thermodynamic Parameters and Microstructures of Quaternary Cu₇₉–Al₁₂–Ni₄–Nb₅ (wt%) Shape Memory Alloy. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions A: Science*, 44 (3): 903-910.

- [20] Qader I.N., Öner E., Kok M., Mohammed S.S., Dağdelen F., Kanca M.S., Aydoğdu Y. 2020. Mechanical and Thermal Behavior of $Cu_{84-x}Al_{13}Ni_3Hf_x$ Shape Memory Alloys. Iranian Journal of Science and Technology, Transactions A: Science, doi:10.1007/s40995-020-01008-w.
- [21] Qader I.N., Kok M., Cirak Z.D. 2020. The effects of substituting Sn for Ni on the thermal and some other characteristics of NiTiSn shape memory alloys. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 1-10.
- [22] Tatar C., Acar R., Qader I.N. 2020. Investigation of thermodynamic and microstructural characteristics of NiTiCu shape memory alloys produced by arc-melting method. The European Physical Journal Plus, 135 (3): 1-11.
- [23] Cisse O., Savadogo O., Wu M., Yahia L.H. 2002. Effect of surface treatment of NiTi alloy on its corrosion behavior in Hanks' solution. Journal of Biomedical Materials Research: An Official Journal of The Society for Biomaterials, The Japanese Society for Biomaterials, and The Australian Society for Biomaterials and the Korean Society for Biomaterials, 61 (3): 339-345.
- [24] Zhou L., Lv G.-H., Ji C., Yang S.-Z. 2012. Application of plasma polymerized siloxane films for the corrosion protection of titanium alloy. Thin Solid Films, 520 (7): 2505-2509.
- [25] Pakshir M., Bagheri T., Kazemi M. 2013. In vitro evaluation of the electrochemical behaviour of stainless steel and Ni-Ti orthodontic archwires at different temperatures. The European Journal of Orthodontics, 35 (4): 407-413.