

Ti₅₀Ni₂₇Nb₂₀Ta₃ Şekil Hatırlamalı Alaşımında Isıl İşlemlerin Faz Dönüşüm Histeresizi ve Termal Aktivasyon Enerjisi Üzerine Etkilerinin İncelenmesi

Esra BALCI^{1*}, Fethi DAĞDELEN²

¹ Fizik Bölümü, Fen Edebiyat Fakültesi, İnönü Üniversitesi, Malatya, Türkiye

² Fizik Bölümü, Fen Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye

*¹ eesra0122@gmail.com, ² fdagdelen@firat.edu.tr

(Geliş/Received: 12/09/2023;

Kabul/Accepted: 20/02/2024)

Öz: Bu çalışmada dördü TiNiNbTa alaşımına farklı ısıl işlemler uygulanarak alaşımın termal parametreleri üzerine ısıl işlemlerin etkileri incelendi. Isıl işlem sıcaklıkları 700°C, 800°C ve 900°C seçildi. Isıl işlem yapılan alaşımların DSC eğrileri farklı ısıtma-soğutma hızına bağlı olarak alındı. Isıl işlem sıcaklığını artmasına bağlı alaşımın dönüşüm sıcaklıklarının azaldığı belirlendi. Fakat artan ısıl işlem sıcaklığı ile termal aktivasyon enerjisinin önemli derecede arttığı gözlemlendi. Ayrıca ısıl işlem sıcaklığının artması austenite faz pik minimumunu (A_p) ve dönüşüm histeresizini (H_f) önemli derecede azalttığı gözlemlendi.

Anahtar kelimeler: TiNiNbTa, Şekil Hatırlamalı Alaşım, Termal Parametreler, Dönüşüm Histeresizi.

Investigation of The Effects of Heat Treatments on Phase Transformation Hysteresis and Thermal Activation Energy in Ti₅₀Ni₂₇Nb₂₀Ta₃ Shape Memory Alloy

Abstract: In this study, the effects of heat treatments on the thermal parameters of the alloy were investigated by applying different heat treatments to the quaternary TiNiNbTa alloy. Heat treatment temperatures of 700°C, 800°C and 900°C were selected. DSC curves of heat-treated alloys were taken depending on different heating-cooling rates. It was determined that the transformation temperatures of the alloy decreased due to the increase in the heat treatment temperature. However, it was observed that the thermal activation energy increased significantly with increasing heat treatment temperature. In addition, it was observed that increasing the heat treatment temperature significantly decreased the austenite phase peak minimum (A_p) and conversion hysteresis (H_f).

Key words: TiNiNbTa, Shape Memory Alloys, Thermal Parameters, Transformation Hysteresis.

1. Giriş

Şekil hatırlamalı alaşımlar (ŞHA) akıllı malzemelerin bir alt grubu olmakla beraber, uygulanan termomekanik zorlar ile faz dönüşümleri sergileyebilen ve belirli sıcaklıkların üzerinde ısıtıldığında eski haline geri dönebilen alaşımlar olarak tanımlanır. ŞHA'lar diğer alaşımlardan farklı kılan en önemli karakteristikleri şekil hatırlama etkisi (SHE) ve süper elastiklik (SE) özellik göstermeleridir [1]. Bu özellikleri en çok taşıyan alaşımlar NiTi alaşımları başta olmak üzere, birçok bakır bazlı (CuAlNi, CuZnAl gibi), demir bazlı (FePt, FeMnSi gibi), gümüş bazlı (AgAuCu) ve altın bazlı (AuCuAl) alaşımlardır [2]. Şekil hatırlamalı alaşımlar için faz dönüşüm sıcaklıkları martensite başlama: M_s , martensite bitiş: M_f , austenite başlama: A_s ve austenite bitiş: A_f değerleri şekil hatırlama davranışını karakterize etmek için önemli sıcaklıklardır. Martensitik faz dönüşümleri gerçekleştiğinde çok sayıda fiziksel özellikte değişmektedir. Alaşım kristal yapı değişikliği yapar NiTi alaşımları martensite fazda iken B19' kristal yapıda iken austenite faza geçişte B2 kristal yapıya dönüş yapar. Austenite faz yüksek sıcaklık fazı olarak tanımlanır ve kübik yapıdadır. Bu değişiklikler dönüşüm sıcaklıklarının ölçülmesine izin verir. Bu amaçla diferansiyel kalorimetrik tarama cihazı (DSC) veya elektriksel iletkenlik ölçüm yöntemleri kullanılarak gerekli analizler yapılır. NiTi bazlı şekil hatırlamalı alaşımlar, üçüncü veya dördüncü elementler katılarak faz dönüşüm sıcaklıklarının değişmesine izin verirken aynı zamanda mekanik özelliklerinin de iyileştirilmesine yardımcı olur. Yüksek korozyon direncine sahip olması, iyi biyouyumluluk özelliği sergilemesi, hafiflik gibi özellikler NiTi bazlı şekil hatırlamalı alaşımlar için istenilen özelliklerdir [3]. Niyobyum (Nb) oksidasyon direnci yüksektir ve yüksek dayanım özelliklerine sahip bir elementtir [4]. Ayrıca, Nb büyük dönüşüm histeresizinin gösterilmesi ve yüksek esnekliğe sahip olması en önemli özellikleridir [5-9]. Özellikle şekil hatırlamalı alaşımlara Tantan (Ta) elementi katılması biyomedikal uygulamalar için ön plana çıkartmaktadır.

* Sorumlu yazar: eesra0122@gmail.com. Yazarların ORCID Numarası: ¹ 0000-0003-0127-7602, ² 0000-0001-9849-590X

NiTi alaşımlarında Ni elementi ile zengin olan NiTi bazlı şekil hatırlamalı alaşımlarda süper esneklik özelliği ön planda iken, Titanyum elementi bakımından zengin olan bu alaşımlarda önemli olan etken şekil hatırlama etkisidir [10, 11]. NiTi bazlı şekil hatırlamalı alaşımlarda gerçekleşen faz dönüşümleri çoklu dönüşüm veya kademeli dönüşüm göstermektedir [12, 13]. Genel olarak, R (rombohedral faz) fazı, B19' fazından önce gözlemlenen kademeli dönüşümü temsil etmektedir. NiTi bazlı şekil hatırlamalı alaşımların ısıl işlem ve kimyasal bileşimi, dönüşüm sıcaklıklarını etkileyen önemli faktörlerdir [14]. Bu alaşımlara katılan Pd, Hf, Pt ve Zr martensit dönüşüm sıcaklıklarını, histerisizlikleri ve termomekaniksel karakteristiklerini arttırmak için eklenirken; Fe, Al, Mo ve Nb elementlerinin katılması bu karakteristikleri azaltmaktadır [14, 15]. Üçlü NiTiNb ŞHA'lar üzerine araştırma olmasına rağmen, dörtlü NiTiNbTa alaşımı ve bunlara uygulanan termal iyileştirmeyi araştıran çalışmalar yok denecek kadar azdır.

Bu çalışmada NiTiNbTa alaşımı ark ergitme yöntemi ile üretildi, alaşıma farklı ısıl işlemler yapılarak faz dönüşüm sıcaklıkları ve termal aktivasyon enerjilerinin değişimi araştırıldı.

2. Materyal ve Yöntem

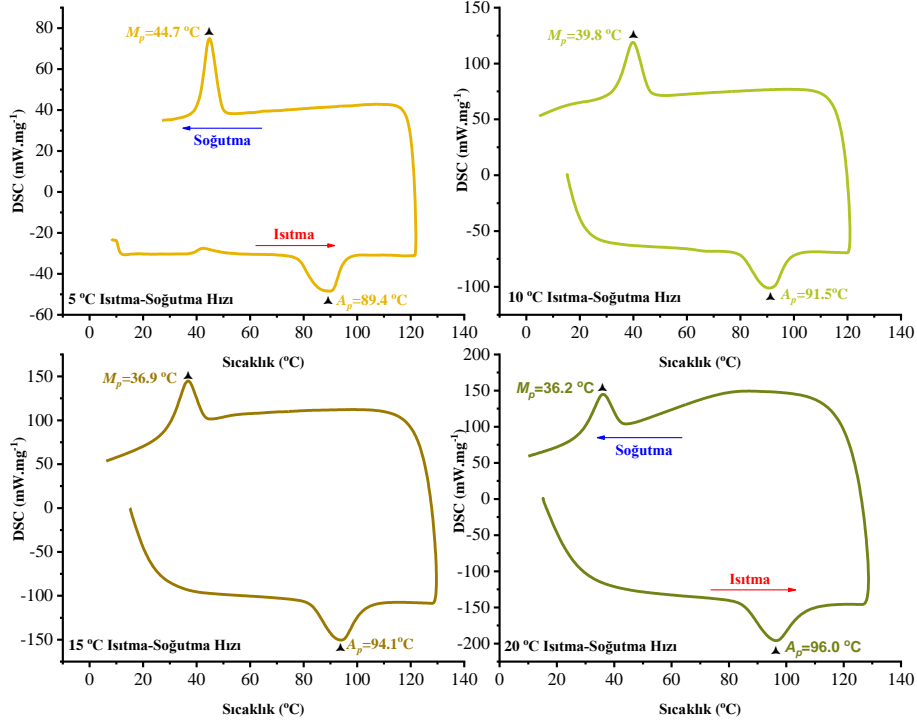
Bu çalışmada incelenen Ti₅₀Ni₂₇Nb₂₀Ta₃ (% atomik) şekil hatırlamalı alaşım ark ergitme yöntemiyle üretildi. Ek olarak, ark ergitme işlemi alaşımın homojenliğini koruması için birkaç kez tekrarlandı. Alaşımı oluşturan metal tozları yaklaşık % 99,9 saflıkta seçildi. Hazırlanan alaşımlar sırası ile 700°C, 800°C ve 900°C'de 24 saat ısıl işleme tabi tutuldu. DSC (Differential Scanning Calorimeter) yardımıyla farklı sıcaklıkta ısıl işleme tabi tutulmuş alaşımın dönüşüm sıcaklıkları araştırıldı. Faz dönüşüm sıcaklıklarını ve termal aktivasyon enerjilerini belirlemek için Perkin Elmer Sapphire marka DSC cihazı ile 5, 10, 15 ve 20 °C/dak. ısıtma ↔ soğutma hızıyla azot gazı atmosferinde ısı akısı ölçümleri yapıldı.

3. Bulgular ve Tartışma

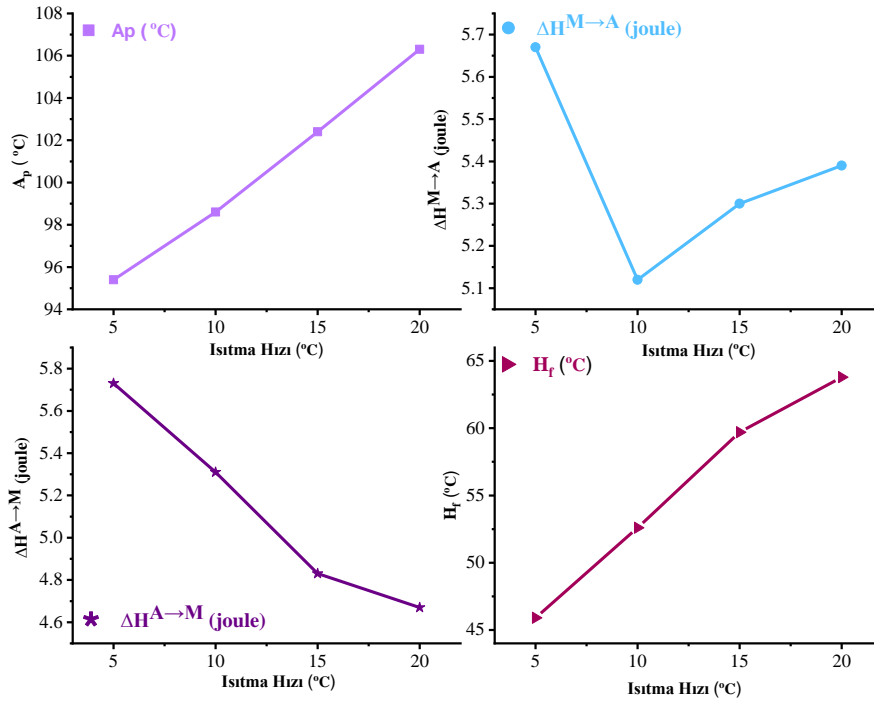
Dörtlü element içeren TiNiNbTa alaşımın termal özelliklerini araştırmak için farklı üç sıcaklıkta ısıl işlemlere tabi tutuldu. Alaşımın 700°C derecede 24 saat ısıl işlemden sonra farklı ısıtma-soğutma sonucu elde edilen DSC grafikleri Şekil 1 üzerinde ve grafiklerden elde edilen termal parametreler Tablo 1'de içerisinde verildi. Şekil 1 üzerinde alaşımın ısıl işlemden sonra alınan faz geçişlerinin B19'↔B2 olduğu görülmektedir. NiTi alaşımlarında B19' monoklinik, B2 kübik kristal yapıdadır [16-18]. DSC eğrileri ve Tablo 1 incelendiğinde ısıtma hızlarının artışı, alaşımın A_s , A_f , A_p sıcaklıklarını arttırdığı, fakat M_s ve M_f sıcaklıklarını düşürdüğü görülmektedir. Bunun yanı sıra monoklinik kristal yapıdan kübik kristal yapıya geçiş için gerekli entalpi enerjisi $\Delta H^{M \rightarrow A}$ artmaktadır. Soğutma esnasında, düz dönüşüm olarak da bilinen austenit yapıdan martensite yapıya geçiş için verilen enerji $\Delta H^{A \rightarrow M}$ ise artan ısıtma hızına bağlı olarak azalmaktadır. Aynı ısıtma ve soğutma hızında gözlenen entropiler arasındaki farkın ise; $\Delta H = \Delta H^{M \rightarrow A} - \Delta H^{A \rightarrow M}$ iç enerjilere harcandığı bilinir. Bu genellikle B19' yapıdan B2 yapıya geçişlerde iç sürtülmelere harcanan enerjidir [19]. Şekil 2'de verildiği gibi 700°C'de ısıl işleme tabi tutulan alaşımın ısıtma soğutma hızına bağlı değişen bazı termal parametreleri verilmiştir. Bu grafiklerden austenit fazın maksimumu olan A_p ve iki faz arasındaki sıcaklık farkı olan H_f 'nin ($H_f = A_p - M_p$) artan ısıtma hızı ile arttığı görülmektedir.

Tablo 1. TiNiNbTa alaşımının 700°C'de ısıl işlemden sonra faz dönüşüm sıcaklıkları ve entalpi değişimi.

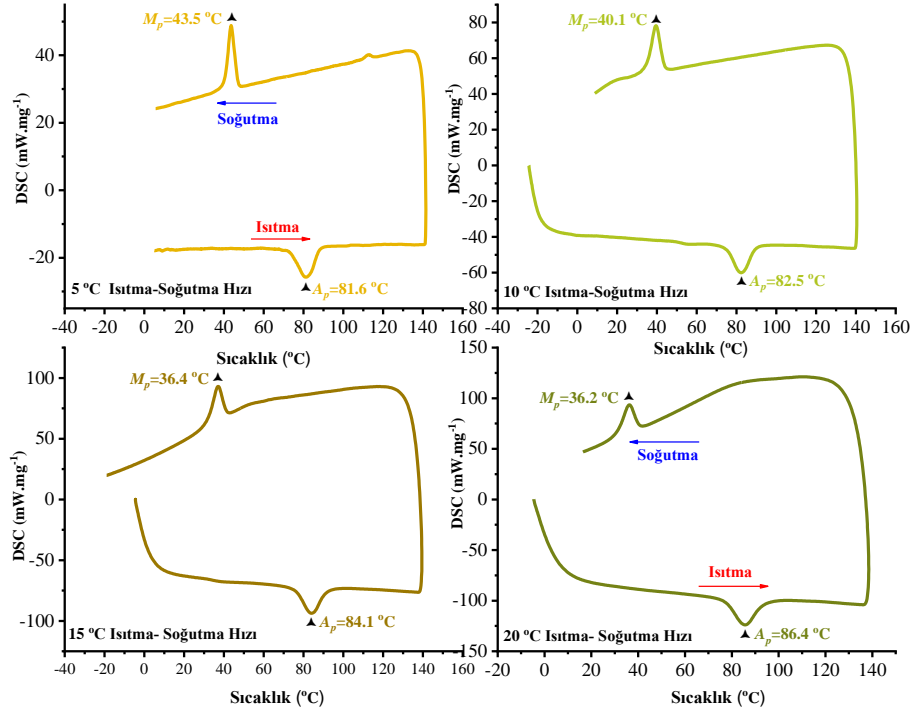
Isıtma- Soğutma Hızı (°C/dk)	A_s (°C)	A_f (°C)	A_p (°C)	M_s (°C)	M_f (°C)	$\Delta H^{M \rightarrow A}$ (J/g)	$\Delta H^{A \rightarrow M}$ (J/g)	H_f (°C)
5	77,0	95,4	89,4	49,5	40,6	5,67	-5,73	45,9
10	79,6	98,6	90,7	46,0	33,9	5,12	-5,31	52,6
15	81,7	102,4	94,0	42,7	28,8	5,30	-4,83	59,7
20	84,4	106,3	96,5	42,5	28,5	5,39	-4,67	63,8



Şekil 1. TiNiNiTa alaşımının 700°C’de ısıl işlemden sonra 5,10,15,20°C/dak ısıtma-soğutma hızıyla alınan DSC grafiği.



Şekil 2. TiNiNiTa alaşımının 700°C’de ısıl işlemden sonra farklı ısıtma hızına bağlı bazı termal parametrelerin değişim grafiği.

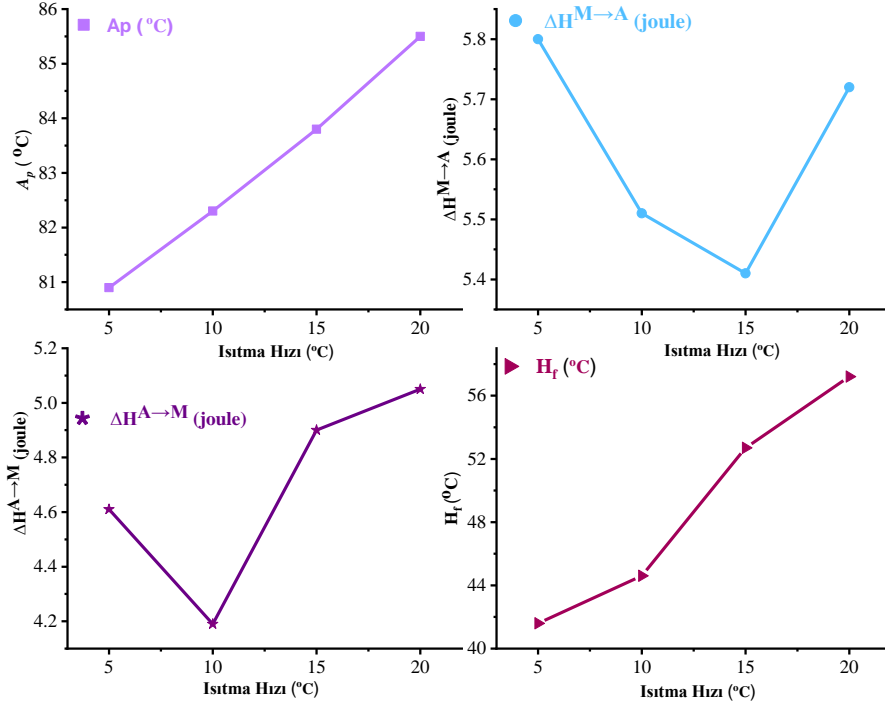


Şekil 3. TiNiNiTa alaşımının 800°C’de ısıl işleminden sonra 5,10,15,20°C/dak ısıtma-soğutma hızıyla alınan DSC grafiği.

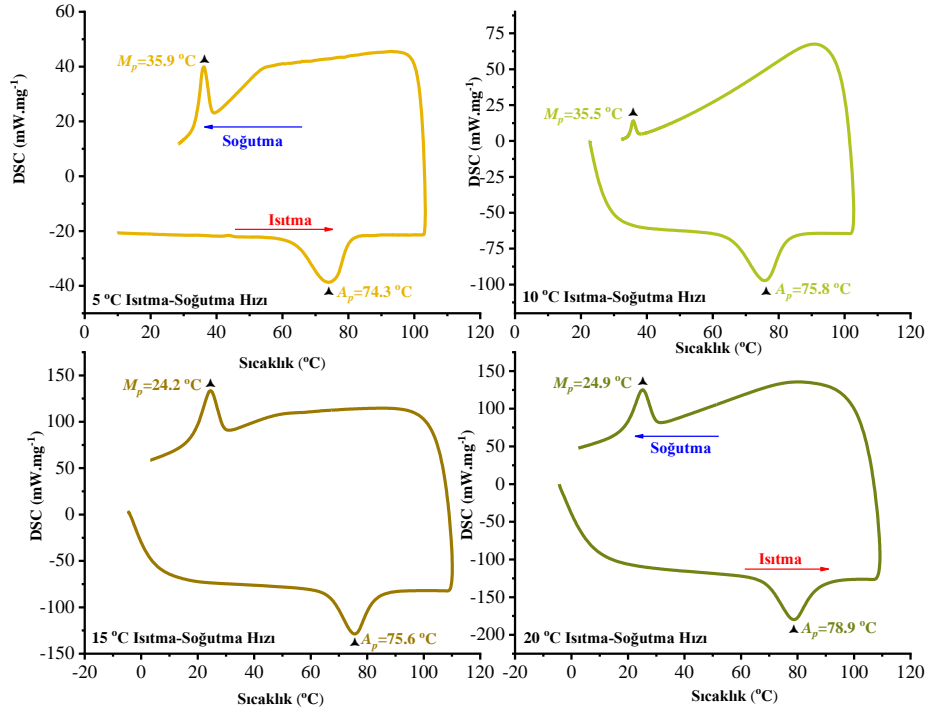
Şekil 3’de verildiği gibi TiNiNiTa alaşımının 800°C’de ısıl işleminden sonra 5,10,15,20°C/dak ısıtma-soğutma hızıyla alınan DSC grafiği gösterilmiştir. Isıtma esnasında ters dönüşüm olarak da adlandırılan martensite fazdan austenite faza ve düz dönüşüm olarak bilinen austenit fazdan martensit faza geçiş eğrileri açıkça görülmektedir. Bu grafiklerden elde edilen termal parametreler Tablo 2 içerisinde verilmiştir. Tablo 2 incelendiğinde ısıtma hızlarının artışı, alaşımın A_s , A_f , A_p sıcaklıklarını arttırdığı, fakat M_s ve M_f sıcaklıklarını düşürdüğü görülmektedir. Ayrıca, B19’ yapıdan B2 yapıya geçiş için gerekli entalpi enerjisi $\Delta H^{M \rightarrow A}$ azalmakta ve $\Delta H^{A \rightarrow M}$ enerjisi artmaktadır. Şekil 4’de görüldüğü gibi alaşımın histeresizi ısıtma-soğutma hızının artması ile arttığı açıktır.

Tablo 2. TiNiNbTa alaşımının 800°C’ de ısıl işleminden sonra faz dönüşüm sıcaklıkları ve entalpi değişimi.

Isıtma-Soğutma Hızı (°C/dk)	A_s (°C)	A_f (°C)	A_p (°C)	M_s (°C)	M_f (°C)	$\Delta H^{M \rightarrow A}$ (J/g)	$\Delta H^{A \rightarrow M}$ (J/g)	H_f (°C)
5	72,7	88,1	80,9	47,3	40,3	5,80	-5,87	40,8
10	75,3	89,5	82,3	44,0	34,2	5,48	-5,31	45,5
15	76,2	92,2	83,8	41,5	30,6	5,43	-4,84	50,7
20	77,3	94,2	85,5	40,8	30,1	5,25	-4,87	53,4



Şekil 4. TiNiNiTa alaşımının 800°C’de ısıl işlemden sonra farklı ısıtma hızına bağlı bazı termal parametrelerin değişim grafiği.

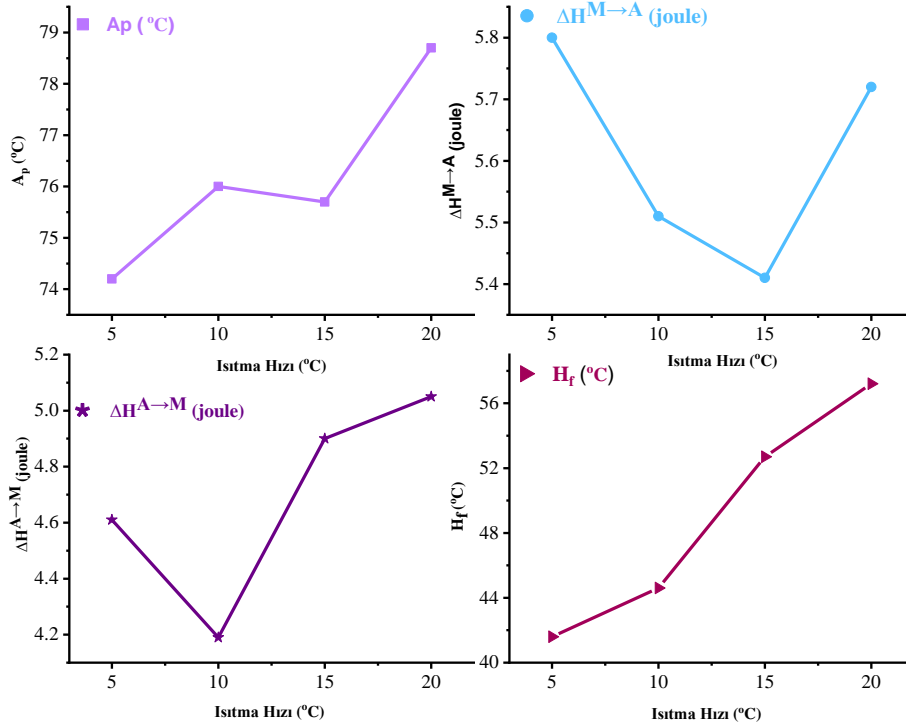


Şekil 5. TiNiNbTa alaşımının 900°C’de ısıl işlemden sonra 5,10,15,20°C/dak ısıtma-soğutma hızıyla alınan DSC grafiği.

Tablo 3. TiNiNbTa alaşımının 900°C’de ısıl işleminden sonra faz dönüşüm sıcaklıkları ve entalpi değişimi.

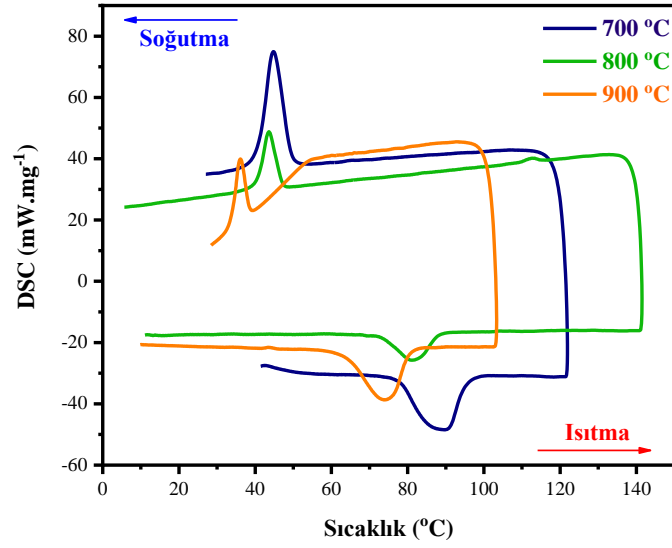
Isıtma-Soğutma Hızı (°C/dk)	A_s (°C)	A_f (°C)	A_p (°C)	M_s (°C)	M_f (°C)	$\Delta H^{M \rightarrow A}$ (J/g)	$\Delta H^{A \rightarrow M}$ (J/g)	H_f (°C)
5	64,1	80,2	74,2	38,6	33,8	5,80	-4,61	41,6
10	66,3	82,1	76,0	37,5	34,7	5,51	-4,19	44,6
15	66,3	82,3	75,7	29,6	18,5	5,41	-4,90	52,7
20	68,8	87,3	78,7	30,1	19,0	5,72	-5,05	57,2

TiNiNiTa alaşımının 900°C’de ısıl işleminden sonra farklı ısıtma-soğutma hızıyla alınan DSC grafikleri Şekil 5 üzerinde, DSC eğrilerinden alınan termal parametreler ise Tablo 3 içerisinde verildi. Şekil 5 ve Tablo 3’de görüldüğü gibi termal iyileştirme (termal işlemler) ve ısıtma hızı alaşımın dönüşüm sıcaklıklarını etkilemiştir. Tablo 3 incelendiğinde ısıtma hızlarının artışı, alaşımın A_s , A_f , A_p sıcaklıklarını arttırdığı, fakat M_s ve M_f sıcaklıklarını düşürdüğü görülmektedir. Ayrıca hem martensite fazdan austenite faza hem de austenite fazdan martensite faza geçiş için gerekli enerjisi entalpileri değiştirmektedir. Ayrıca ısıtma soğutma hızı dönüşüm histeresizini de arttırmaktadır. Bu değişimler Şekil 6’ da görüldüğü üzere daha belirgindir.

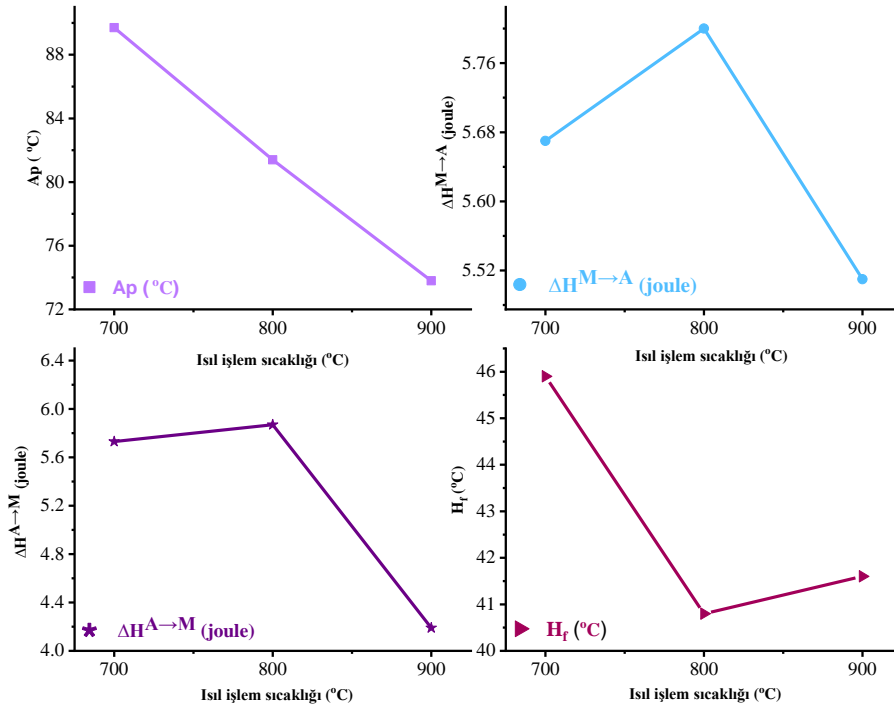


Şekil 6. TiNiNiTa alaşımının 900°C’de ısıl işleminden sonra farklı ısıtma hızına bağlı bazı termal parametrelerin değişim grafiği.

TiNiNiTa alaşımın 5°C/dak ısıtma-soğutma hızı ile alınan DSC eğrileri Şekil 7’de üzerinde verilmektedir. Bu grafik incelendiğinde ısıl işlem sıcaklığının artması dönüşüm sıcaklıklarını azalttığı görülmektedir. Aynı zamanda Şekil 8 incelendiğinde A_p , $\Delta H^{M \rightarrow A}$, $\Delta H^{A \rightarrow M}$ ve H_f termal parametrelerinin ısıl işleme duyarlı olduğu ve ısıl işlem sıcaklığı artışı bu parametreleri de azalttığı belirlenmiştir.



Şekil 7. TiNiNbTa alaşımının 700°C, 800 °C ve 900 °C’ de ısıl işlemden sonra 5°C/dak ısıtma-soğutma hızında alınan DSC grafiğinin karşılaştırılması.



Şekil 8. TiNiNbTa alaşımının 700°C, 800 °C ve 900 °C’ de ısıl işlemden sonra 5°C/dak ısıtma-soğutma hızında alınan DSC eğrilerinden elde edilen bazı termal parametrelerinin karşılaştırılması.

Başka bir termal parametre olan termal aktivasyon enerjisini hesaplamak için üç yöntem vardır. Bunlar Kissinger [20], Ozawa [21] ve Takhor [22] yöntemleridir. Bu yöntemler farklı ısıtma hızı ile bu ısıtma hızına bağlı elde edilen A_p sıcaklıkları tespit edilir. Aşağıdaki formüllerden faydalanılarak termal aktivasyon enerjileri hesaplanır [23].

$$\frac{d(\ln(\beta/A_p^2))}{d(1/A_p)} = -\frac{E}{R} \quad \text{Kissinger} \quad (1)$$

$$E \cong -2.19R - \frac{d \log \beta}{d(1/A_p)} \quad \text{Ozawa} \quad (2)$$

$$\frac{d(\ln(\beta))}{d(1/A_p)} = -\frac{E}{R} \quad \text{Takhor} \quad (3)$$

Burada E termal aktivasyon enerjisi, R evrensel gaz sabiti (R=8314 J/mol), β ısıtma hızı ve A_p austenite fazın minimumudur. Farklı ısıl işlemlerin termal aktivasyon enerjilerini hesaplamak için bu iki yöntemle hesaplanmıştır ve Tablo 4 içerisinde verilmiştir. Tablo 4 incelendiğinde termal aktivasyon enerjisi ısıl işlem sıcaklığı yükseldikçe arttığı görülmüştür.

Tablo 4. TiNiNbTa alaşımın farklı ısıl işlemlerden sonra hesaplanan termal aktivasyon enerjileri ve ortalaması.

Yöntem	700 °C'de ısıl işlemler numune	800 °C'de ısıl işlemler numune	900 °C'de ısıl işlemler numune
E _{Kissinger} (kJ/mol)	190,5	305,8	278,0
E _{Ozawa} (kJ/mol)	186,9	296,5	269,9
E _{Takhor} (kJ/mol)	196,6	311,7	283,8
E _{ortalama} (kJ/mol)	191,3	304,7	277,2

4. Sonuç

Şekil hatırlamalı alaşımlar mekanik, ısı, elektriksel-kimyasal işlemler ve çevresel şartlar altında üstün termomekanik ve termo elektriksel davranış sergilerler. Faz dönüşüm sıcaklıkları ise genellikle mikroyapı farklılıkları ve malzemeye uygulanan farklı ısıl işlemlerden etkilenebilir. Faz dönüşümleri (martensit ve austenit), şimdilerde şekil hatırlama özelliğine sahip yeni malzemelerin yapımında kullanılmalarından dolayı büyük teknolojik önem taşımaktadır. Bu özelliklerin değiştirilmesi sonucunda otomobil, havacılık, biyomedikal ve robot endüstrisi gibi farklı sistemlerde yeni alaşım üretmek yerine ısıl işlemler uygulayarak, alaşımın fiziksel ve mekanik özelliklerini değiştirerek bu sistemler kullanılabilir hale gelebilir. TiNiNbTa şekil hatırlamalı alaşımında termal işlemlerin termal parametreleri üzerine etkileri araştırılan bu çalışmada aşağıdaki sonuçlar öne çıkmıştır.

- Isıl işlem sıcaklığı faz dönüşüm sıcaklıkları ve dönüşüm entalpisi etkiledi. Isıl işlem sıcaklığı arttıkça austenite faz dönüşüm sıcaklığı, martensite faz dönüşüm sıcaklığı, her iki fazın dönüşüm entalpisi, faz dönüşüm histeresizi belirgin bir şekilde azaldı.
- Yapılan farklı ısıl işlemlerde, alaşımın DSC sonuçlarında ısıtma hızlarının artması austenite faz dönüşüm sıcaklığı, austenite faz dönüşüm entalpisi ve faz dönüşüm histeresizini arttırırken, martensite faz dönüşüm entalpisini azalttı.
- Yapılan ısıl işlemler termal aktivasyon enerjisini büyük ölçüde etkiledi. Isıl işlem sıcaklığı arttıkça termal aktivasyon enerjisi arttığı belirlendi.

Teşekkür

Bu çalışma Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi (FÜBAP) FF 23.03 projesi ile desteklenmiştir. F.D, fikir sahibi, E.B. deneyleri gerçekleştirdi F.D. ve E.B. sonuçları yorumladı, F.D makaleyi yazdı.

Kaynaklar

- [1] Patoor E, Lagoudas D.C, Entchev P.B, Brinson L.C and Gao X. Shape memory alloys, Part I: General properties and modeling of single crystals, *Mechanics of materials* 2006;38:391-429.
- [2] Nishiyama Z. Martensitic transformation. Elsevier: Academic Pres, 2012.
- [3] Liu J. and Y Guo. Process capability of wire-edm of NiTi shape memory alloy at main cut and trim cut modes, *Procedia Manufacturing* 2015;1: 904-914.
- [4] Dagdelen F. and Y Aydogdu. Transformation behavior in NiTi–20Ta and NiTi–20Nb SMAs, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* 2019;136: 637-642.
- [5] Piao M, Miyazaki S, Otsuka K. Characteristics of deformation and transformation in Ti44Ni47Nb9 shape memory alloy, *Materials Transactions JIM* 1992; 33: 346-353.
- [6] Zhang C.S, Zhao L.C, Duering T.W. and Wayman C.M. Effects of deformation on the transformation hysteresis and shape memory effect in a Ni47Ti44Nb9 alloy, *Scripta Metallurgica et Materialia* 1990;24:1807-1812.
- [7] Zhang C.S, Wang Y.Q, Chai W. and Zhao L.C. The study of constitutional phases in a Ni47Ti44Nb9 shape memory alloy, *Materials Chemistry and Physics* 1991;28:43-50.
- [8] He X.M, Rong L.J, Yan D.S. and Li Y.Y. Temperature memory effect of Ni47Ti44Nb9 wide hysteresis shape memory alloy, *Scripta materialia* 2005;53:1411-1415.
- [9] Sui J.H, Gao Z.Y, Li Y.F, Zhag Z.G. and Cai W. A study on NiTiNbCo shape memory alloy, *Materials Science and Engineering: A* 2009;508: 33-36.
- [10] Bhagyaraj J, Ramiah K.V, Saikrishma C.N. and Bhaumik S.K. Behavior and effect of Ti2Ni phase during processing of NiTi shape memory alloy wire from cast ingot, *Journal of alloys and compounds* 2013;581: 344-351.
- [11] El-Bagoury N. Comparative study on microstructure and martensitic transformation of aged Ni-rich NiTi and NiTiCo shape memory alloys, *Metals and Materials International* 2016; 22: 468-473.
- [12] Eggeler G, Allafi J.K, Gollerthan S, Somsen C, Schmahl W. and Sheptyakow D. On the effect of aging on martensitic transformations in Ni-rich NiTi shape memory alloys, *Smart materials and structures* 2005;14: 186.
- [13] Dovchinanchig M, Zhao C.W, Zhao S.L, Meng X.K, Jin Y.J. and Xing Y.M. Effect of Nd addition on the microstructure and martensitic transformation of Ni-Ti shape memory alloys, *Advances in Materials Science and Engineering* 2014;6:489-701.
- [14] Zhao Y.N, Jiang S.Y, Zhang Y.Q. and Liang Y.L. Influence of Fe addition on phase transformation, microstructure and mechanical property of equiatomic NiTi shape memory alloy, *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)* 2017;30: 762-770.
- [15] Kök M, Zardawi H.S.A, Qader I.N and Kanca M.S. The effects of cobalt elements addition on Ti2Ni phases, thermodynamics parameters, crystal structure and transformation temperature of NiTi shape memory alloys, *The European Physical Journal Plus* 2019;134:197.
- [16] Balci E. and Dagdelen F. Thermal, structural properties and potential dynamic corrosion study of Ti-27Ni-21Nb-2Ta SMA, *Iranian Journal of Science and Technology Transactions A: Science* 2022;46: 353-359.
- [17] Balci E. and Dagdelen F. The comparison of TiNiNbTa and TiNiNbV SMAs in terms of corrosion behavior, microhardness, thermal and structural properties, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* 2022;147:10943-10949.
- [18] Balci E, Dagdelen F, Qader I.N and Kök M. Effects of substituting Nb with V on thermal analysis and biocompatibility assessment of quaternary NiTiNbV SMA, *The European Physical Journal Plus* 2021;136: 145.
- [19] Ercan E, Dagdelen F, Kök M. and Balci E. Investigation of Thermodynamic Properties of Ni30Ti20Cu20 Shape Memory Alloy, *Bitlis Eren University Journal of Science* 2019; 8: 1194-1202.
- [20] Kissinger H.E. Reaction kinetics in differential thermal analysis, *Analytical chemistry* 1957;29:1702-1706.
- [21] Ozawa T.A. New method of analyzing thermogravimetric data, *Bulletin of the chemical society of Japan* 1965; 38:1881-1886.
- [22] Takhor R. Advances in nucleation and crystallization of glasses, *American Ceramics Society Columbus* 1971;166: 13-23.
- [23] Mohammed S.S, Balci E, Dagdelen F and Saydam S. Comparison of Thermodynamic Parameters and Corrosion Behaviors of Ti50Ni25Nb25 and Ti50Ni25Ta25 Shape Memory Alloys, *Physics of Metals and Metallography* 2022;123: 1427-1435.