Süleyman Demirel Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi
Cilt 23, Sayı 1, 15-19, 2019

Süleyman Demirel University
Journal of Natural and Applied Sciences
Volume 23, Issue 1, 15-19, 2019

DOI: 10.19113/sdufenbed.450724

Mn İçeriğinin $Mn_{50-x}Ni_{41+x}Sn_9$ (x = 0, 2, 4) Manyetik Şekil Hafızalı Alaşımlarının Termal ve Manyetik Özelliklerine Etkisi

Merivan ŞAŞMAZ

Adıyaman Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü, Adıyaman
(ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4243-7169)

(Alınış / Received: 03.08.2018, Kabul / Accepted: 15.02.2019, Online Yayınlanma / Published Online: 15.04.2019)

Anahtar Kelimeler
MnNiSn,
Manyetik şekil hafızalı alaşımlar,
DSC,
VSM,
Termomanyetizasyon

Özet: Manyetik şekil hafızalı alaşımlarda (MŞHA) martensitik dönüşüm sıcaklıkları ve manyetik özellikler, alaşımı oluşturan metallerin kompozisyonuna güçlü bir şekilde bağlıdır. NiMn temelli MŞHA' da yüksek Mn içeriğinin martensitik dönüşüm sıcaklıkları ve manyetizasyon değerleri üzerine etkisi önem taşımaktadır. Bu çalışmada, $Mn_{50-x}Ni_{41+x}Sn_9$ (x = 0, 2, 4) MŞHA' da yüksek Mn içeriğinin termal ve manyetik özelliklere etkisi rapor edildi. Alaşımlar indüksiyon eritme/döküm metodu ile hazırlandı ve 72 saat 900 ^oC' de argon atmosferinde ısıl işleme maruz kaldı ve daha sonra suda ani soğutuldu. Hazırlanan malzemelerin martensitik dönüşüm sıcaklıkları ve sıcaklığa bağlı manyetizasyon ölçümleri diferansiyel taramalı kalorimetresi (DSC) ve titreşimli örnek manyetometresi (VSM) ile yapıldı. Sonuç olarak DSC ölçümleri ve termomanyetizasyon (M-T) eğrilerinden, Mn içeriğinin alaşımların martensitik dönüşüm sıcaklıkları ve manyetizasyon değerlerini değiştirdiği tespit edildi. Mn miktarı artışına bağlı olarak martensitik dönüşüm sıcaklıklarında azalma ve bu sıcaklıklardaki manyetizasyon değerlerinde ani atlayışlar görüldü. Ayrıca manyetizasyon değerlerinde de Mn miktarı düştükçe azalma gözlendi.

The Effect of Mn Content on Thermal and Magnetic Properties of $Mn_{50-x}Ni_{41+x}Sn_9$ (x = 0, 2, 4) Magnetic Shape Memory Alloys

Keywords
MnNiSn,
Magnetic shape memory alloys,
DSC,
VSM,
Thermomagnetization

Abstract: In magnetic shape memory alloys (MSMA), martensitic transformation temperatures and magnetic properties are strongly correlated with the composition of compounds. High Mn concentration in NiMn based MSMA has important effects on martensitic transformation temperatures and magnetization values. In this study, it was reported that the effect of Mn content on thermal and magnetic properties of $Mn_{50-x}Ni_{41+x}Sn_9$ (x = 0, 2, 4) MSMA. Considered alloys were prepared by an induction melting/casting method, and they were heat treated at 900 ^oC for 72 hours in argon atmosphere and then quenched into water. Prepared materials' martensitic transformation temperatures and temperature-dependent magnetization measurements were done by differential scanning calorimetry (DSC) and vibrating sample magnetometer (VSM). As a result, it was determined that Mn content changed the martensitic transformation temperatures and magnetization values of alloys by DSC measurements and thermomagnetization (M-T) curves. Depending on the amount of Mn, it was seen that increment of martensitic transformation temperatures and sudden jump magnetization at these temperatures. Also, the magnetization values decreased as the Mn content decreased.

1. Giriş

Son zamanlarda, manyetik şekil hafızalı alaşımlar (MŞHA) geleneksel şekil hafızalı alaşımlarla aynı özelliklere sahip olmalarının yanı sıra manyetik karakteristik özellik sergilemesinden dolayı teknolojik uygulamalarda oldukça geniş bir kullanım alanı elde etmiştir. Bu alaşımlar manyetik alan, zor ve sıcaklığa tepkileri sayesinde manyetik şekil hafıza, devasa manyetodirenç, barokalorik ve

*İlgili yazar: merivansasmaz@gmail.com

manyetokalorik etkiler gibi multifonksiyonel özellikleri bir arada tutarak özellikle akıllı sistemler, manyetik soğutucular, algılayıcılar ve transdüserlerde ilgi çekici hale gelmiştir [1]. Martensitik dönüşüm MŞHA'da ferromanyetik faz geçişiyle beraber ortaya çıktığı için manyetik kontrollü aktüatörler termal kontrollülerden çok daha hızlıdır [1, 2, 3, 4]. Bu alaşımlardaki martensitik dönüşüm, yüksek sıcaklık fazından (austenitten) düşük sıcaklık fazına (martensit) geçiş şeklindedir. MŞHA' da martensit faz zayıf ferromanyetik ya da antiferromanyetik olabilir iken, austenit faz ferromanyetiktir [5, 6]. Martensitik dönüşüm ve manyetik değişim, eş zamanlı olarak optik mikroskop (martensitik dönüşüm) ve manyetik güç mikroskobu (manyetik dönüşüm) ile incelenmektedir [7, 8]. Bu tip incelemeler sonucunda manyetizasyon değerinin büyük olmasının manyetik alan kaynaklı enerjiye ve manyetik alan indüklü martensitik dönüşüme büyük katkı sağladığı gözlemlenmiştir [9, 10, 11, 12, 13]. Manyeto yapısal martensit dönüşüm kompozisyon, manyetik alan, sıcaklık ve diziliş gibi parametrelere çok duyarlıdır [14]. Günümüzde, NiMn temelli Heusler tipi MŞHA geliştirilmektedir çünkü bu tip manyetik alaşımlar NiMnGa gibi geleneksel manyetik alaşımlarla kıyaslandığında dönüşüm fazları arası manyetizasyon değerinin hayli yüksek olduğu ve Mn içeriği artışının manyetik özellikler için kritik olduğu görülmüştür. NiMn temelli MŞHA' da manyetik momentler Mn-Mn atomları arasındaki mesafeye güçlü şekilde bağlıdır ve yüksek Mn konsantrasyonu yüksek manyetizasyon değeri sağlamaktadır [13, 15, 16, 17, 18]. Ni ve Mn arasındaki güçlü hibritleşme bağlanma mekanizmasını etkileyerek martensit geçişe yol açmaktadır. Bu malzemelerde, özellikle yüksek Mn içeren alaşımların martensit geçişin manyetik alan, kompozisyon, sıcaklık gibi faktörlerle etkilenerek pratik uygulamalar için geliştirilmesi gerekmektedir [14, 19]. Mevcut çalışmada, Mn oranınca zengin $Mn_{50-x}Ni_{41+x}Sn_9$ (x=0, 2, 4) MŞHA' da Mn değerinin alaşım sisteminin manyetik ve termal davranışı üzerine etkisine yoğunlaşılmıştır.

2. Materyal ve Metot

Polikristal $Mn_{50-x}Ni_{41+x}Sn_9$ manyetik şekil hafızalı alaşımları atomik oranca x değerinin 0, 2 ve 4 olarak değiştiği nominal kompozisyonlarında yüksek saflıktaki metal elementlerinin argon atmosferi altında indüksiyon fırınıyla eritme ve döküm yoluyla hazırlanmıştır. Çubuk şeklindeki malzemeler 72 saat 900 ˚C sıcaklığında yatay fırınlarda yine argon gazı atmosferi altında tavlanmış ve daha sonra suda ani soğutma işlemi uygulanmıştır. Alaşımların üretim sonrası kompozisyonlarını öğrenmek ve nominal oranlarıyla karşılaştırabilmek için Hitachi marka TM300 masa tipi taramalı elektron mikroskobuna bağlı dedektör kullanılarak enerji dağılımlı X-ışınları analizleri (EDX) yapılmıştır. Martensitik dönüşüm sıcaklıkları tanjant metodu kullanılarak Mettler Toledo DSC 822E model diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC) ile belirlenmiştir. Termomanyetizasyon eğrileri manyetik alan uygulanarak 200 ^oC sıcaklığa kadar Cryogenic marka titreşimli örnek manyetometresi (VSM) ile çalışılmıştır. X= 0 ve 4 olan alaşımlara 1.5 T manyetik alan uygulayarak x=2 alaşımına ise 0.05 T manyetik alan uygulanarak manyetizasyon ölçümleri alınmıştır.

3. Bulgular ve Tartışma

$Mn_{50-x}Ni_{41+x}Sn_9$ (x=0, 2, 4) manyetik şekil hafızalı alaşımlarının atomik ve ağırlıkça yüzdelerinin EDX ile analiz edilen sonuçları tablo 1' de verilmiştir. Tabloya bakıldığında üretim sonrası oranların nominal oranlara yakın olduğu görülmekte olup nominal değerlerden Mn, Ni, Sn elementleri için sırasıyla 0.97, 0. 77, 0.64 ortalama değerleri kadar deneysel süreç sebebiyle değişim tespit edilmiştir. Atom başına valans elektron konsantrasyon oranı (e/a) şekil hafıza etkisi ve martensitik dönüşüm sıcaklıkları için önemlidir [14, 19]. e/a oranı manyetik şekil hafızalı alaşımlarda s, p ve d orbitallerindeki değerlik elektronlarının toplamı alınarak hesaplama formüllerinde kullanılır ve Ni-Mn temelli MŞHA yüksek e/a oranı sergiler [20]. Mevcut alaşım sistemimizde de Mn (7), Ni (10) ve Sn (4) değerlikleri alınarak hesaplanmış ve Tablo 1'e eklenmiştir. e/a değerlerinin düşük Mn içeriğiyle yükseldiği görülmektedir çünkü Ni elementi Mn elementinden daha fazla 3d elektronuna sahiptir [19].

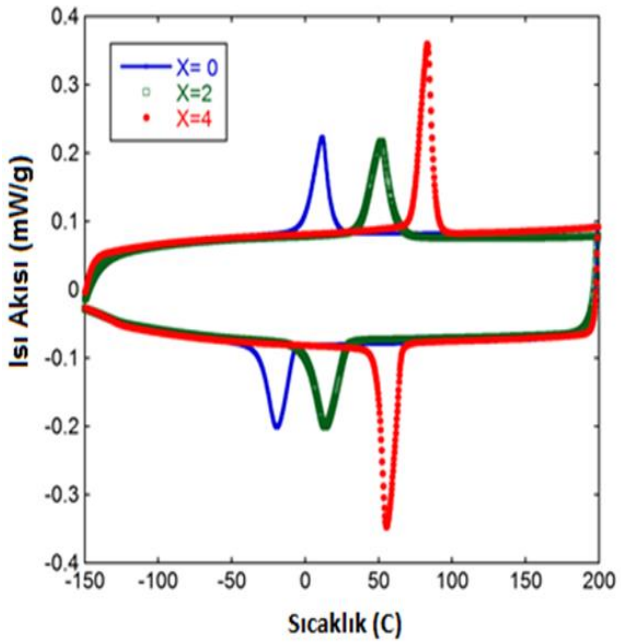
Tablo 1. $Mn_{50-x}Ni_{41+x}Sn_9$ manyetik şekil hafızalı alaşımlarının EDX analizleri ve e/a oranları

	Atomikçe %			Ağırlıkça %			e/a
X	Mn	Ni	Sn	Mn	Ni	Sn	
0	50,45	40,61	8,94	44,58	38,35	17,07	7,96
2	47,45	43,45	9,09	41,8	40,89	17,3	8,02
4	44,07	46,49	9,43	38,62	43,51	17,86	8,08

Şekil 1' de ısıtma ve soğutma sırasında alınan DSC eğrileri verilmiştir. -150 ^oC ve 200 ^oC sıcaklık aralığında alınan DSC ölçümlerinden tanjant metoduyla belirlenen martensitik dönüşüm sıcaklıkları Tablo 2' de verilmiştir.

Tipik olarak MŞHA martensitik dönüşüm temel koşulunu sağlar ve alaşımların pratik uygulamalara sahip olmasını mümkün kılar. Ayrıca, ayarlanabilir bir martensitik dönüşüm ve geniş bir martensitik dönüşüm sıcaklık aralığı gereklidir. DSC eğrilerine bakıldığında ilk olarak ısıl işlem ve tavlama sayesinde keskin piklerin oluştuğu ve pik şiddetlerinin x değeriyle arttığı ve geniş bir martensitik dönüşüm sıcaklık aralığı görülmektedir ki bu durum şekil hafıza etkisinin artışına vesile olabilmektedir. Sırasıyla verilen martensit başlama (Ms), martensit bitiş (Mf), austenit başlama (As) ve austenit bitiş (Af) sıcaklık değerleri ve DSC eğrilerinden açıkça görülebildiği gibi Mn değerindeki azalış ve Ni katkısı

artışıyla martensitik dönüşüm sıcaklıkları artmış ve eğriler sağa doğru kaymıştır. X=0 olduğu alaşımın Ms değeri -7 ˚C iken x=4 değerinin olduğu alaşımda bu sıcaklık 64. 7 ºC olarak ölçülmüştür. Bu durumun e/a oranıyla ilişkili olduğu söylenebilir. X=0 değerindeki alaşımdan x=4 olduğu alaşıma gelindiğinde e/a oranının 0.12 değerinde arttığı hesaplanmıştır. Rapor edilen çalışmalara göre e/a oranının artışıyla martensitik dönüşüm sıcaklıklarının arttığı ve mevcut çalışmanın DSC eğrilerinin literatürle uyumlu olduğu görülmektedir [21, 22].



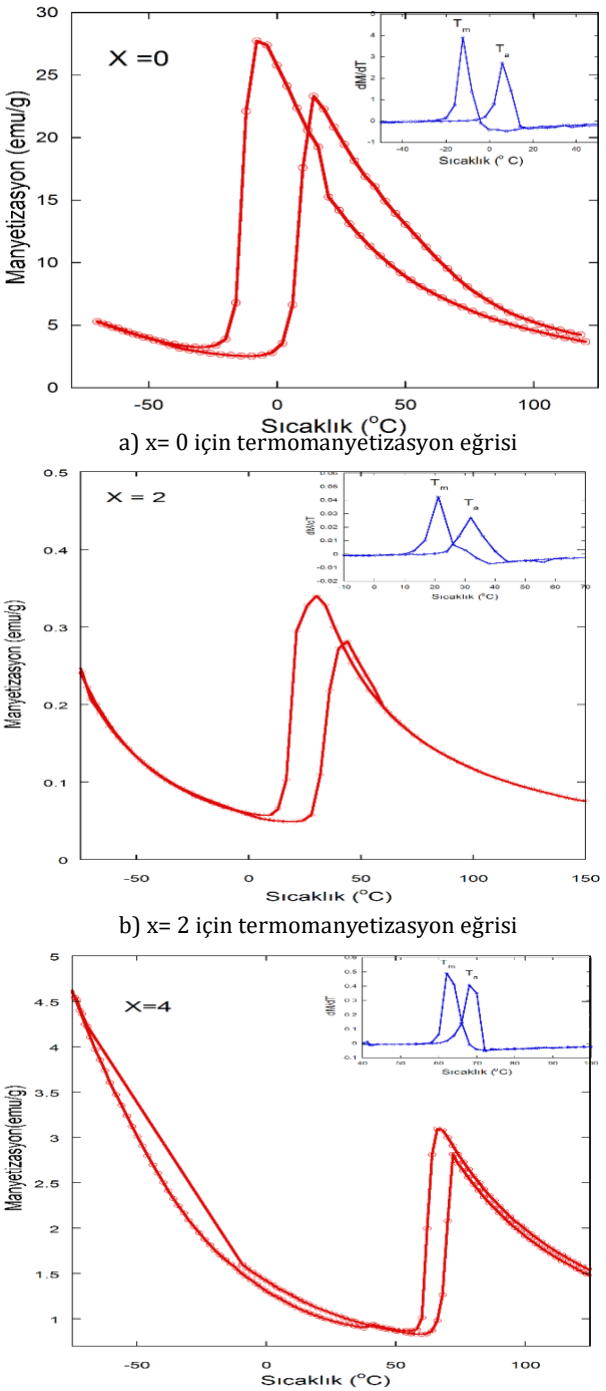
Şekil 1. $Mn_{50-x}Ni_{41+x}Sn_9$ manyetik şekil hafızalı alaşımlarının DSC eğrileri

Tablo 2. $Mn_{50-x}Ni_{41+x}Sn_9$ MŞHA'nın DSC eğrilerinden belirlenen martensitik dönüşüm sıcaklıkları

X	Ms (°C)	Mf (°C)	Tm (°C)	As (°C)	Af (°C)	Ta (°C)
0	-7	-33	-27	-5	22	11
2	29	-5	6	31	69	48
4	64.7	46	55	69	93	83

Şekil 2 a-c' de alaşım sisteminin termomanyetizasyon eğrileri verilmiştir. Manyetik alan alaşımların en iyi martensitik dönüşümü gösterebilmesine göre x=0 ve x=4 olduğu alaşımlarda 1.5 T (Şekil 2 a, c) ve x=2 olduğu alaşımda ise 0.05 T (Şekil 2 b) değerlerinde uygulanmıştır.

Termomanyetizasyon (M-T) eğrilerinden martensit başlama (Ms), martensit bitiş (Mf), austenit başlama (As) ve austenit bitiş (Af) sıcaklık değerleri tanjant metoduyla tespit edilmiş ve Tablo 3' de sırasıyla verilmiştir. Martensit ve austenit dönüşüm sıcaklıkları Tm ve Ta değerleri sıcaklığa karşı manyetizasyonun türevi alınarak bulunmuş olup termomanyetizasyon grafikleri içerisinde ilave edilmiştir.



a) x= 0 için termomanyetizasyon eğrisi

b) x= 2 için termomanyetizasyon eğrisi

c) x= 4 için termomanyetizasyon eğrisi

Şekil 2. x= 0, 2, 4 $Mn_{50-x}Ni_{41+x}Sn_9$ alaşımları için termomanyetizasyon eğrileri

Tablo 3. $Mn_{50-x}Ni_{41+x}Sn_9$ MŞHA'nın M-T grafiklerinden ölçülen martensitik dönüşüm sıcaklıkları

X	Ms (°C)	Mf (°C)	Tm (°C)	As (°C)	Af (°C)	Ta(°C)
0	-8.2	-28.8	-12.5	-7.8	14.2	6.1
2	30	8.6	21.3	22	44	32
4	66	56.8	62	61.4	72	68

Termomanyetizasyon (manyetizasyonun sıcaklığa karşı) eğrilerine bakıldığında her üç alaşımında benzer termomanyetik özellik sergilediği görülmektedir. Isıtma ve soğutma süreci arasındaki

termal histeresis (ΔT) birinci dereceden geçişin bir işaretidir ve bu sıcaklık değerleri sırasıyla x=0, 2 ve 4 alaşımları için yaklaşık 22, 18 ve 8 ˚C' dir [14, 23]. DSC ve M-T eğrilerinden ölçülen Tm ve Ta martensitik dönüşüm sıcaklıkları kıyaslandığında her üç alaşım için yaklaşık 15 ^oC' lik farklar vardır ve bu kısmi farklılık manyetik alan uygulanmasından kaynaklanmaktadır. DSC eğrilerindeki martensitik sıcaklıklarda olduğu gibi termomanyetizasyon eğrilerindeki sıcaklık değerleri de Mn değerleri azaldıkça sağa doğru kaymakta yani artış göstermektedir.

Manyetizasyon değerleri faz geçiş sıcaklıklarına güçlü şekilde bağlıdır. Martensitik dönüşüm sıcaklıklarında manyetizasyon değerlerinde her üç alaşım sisteminde de ani atlayışlar sergilenmekte ve martensitik dönüşüm ferromanyetik austenit fazdan zayıf manyetik martensit faza geçmektedir. Mn temelli alaşımlarda manyetizasyonun esas katkısı Mn içeriği sayesindedir. Mn içeriğindeki azalma alaşımların manyetik özelliklerini direkt olarak etkilemektedir [14, 24, 25]. Bu yüzden manyetizasyon değerleri de Mn içeriği azaldıkça düşme göstermiştir.

Sonuç olarak; $Mn_{50-x}Ni_{41+x}Sn_9$ (x=0,2,4) MŞHA'ı nominal değerlerine yakın olarak üretilmiş olup e/a oranlarının Mn miktarındaki azalmayla arttığı hesaplanmıştır. DSC eğrileri ve termomanyetizasyon ölçümlerinden belirlenen martensitik dönüşüm sıcaklıklarının Mn oranına bağlılığı ve Mn oranı düşüşüyle arttığı görülmüştür. Uygulanan manyetik alan ve Mn içeriğinin ayarlanabilirliğiyle martensitik dönüşüm sıcaklıklarının Mn- Mn arası etkileşmelerine bağlılığı tespit edilmiştir

Teşekkür

Mevcut çalışma The Basque Country Üniversitesi (UPV/EHU) Fen ve Teknoloji Fakültesi Elektrik Elektronik Bölümü ve İleri araştırma merkezi (SGIker) tarafından desteklenmiş olup bu çalışmada benden yardım ve desteklerini esirgemeyen hocalarım Prof. Dr. Volodymyr Chernenko, Prof. Dr. Jose Manuel Barandiaran ve arkadaşım Doç. Dr. Patricia Lazpita' ya teşekkür ederim.

Kaynakça

[1] A. Planes, M. Porta, T. Castan ve A. Saxena, «Magnetostructural Tweed in Ferromagnetic Heusler Shape Memory Alloys,» Materials Science and Engineering, no. 916-918, pp. 438-440, 2006.

[2] Y. Ma ve J. Li, «A Constrained Theory on Actuation Strain in Ferromagnetic Shape Memory Alloys Induced by Domain Switching,» Acta Materilia, cilt 55, pp. 3261-3269, 2007.

[3] M. Marioni, R. O'Handley, S. Allen, S. Hall, D. Paul, M. Richard, J. Feuchtwanger, P. B.W., C. J.M. ve R. Techapiesanchaoenkij, «The Ferromagnetic Shape Memory Effect in Ni-Mn-Ga,» Journal of Magnetism and Magnetic Materials, Cilt %1 / %2290-291, pp. 35-41, 2004.

[4] G. Liu, Z. Liu, X. Dai, S. Yu, J. Chen ve G. Wu, «Investigation on Ferromagnetic Shape Memory Alloys,» Science and Technology of Advanced Materials,, cilt 6, pp. 772-777, 2005.

[5] M. Sasmaz, V. Chernenko, E. Martinez, P. Lázpita ve J. Barandiarán, «Structure and magnetic-field induced effects in Mn-Ni(Fe)-Sn metamagnetic shape memory alloys,» Materials Today: Proceedings, cilt 2S, p. S849 – S852, 2015.

[6] N. Bruno, D. Salas, S. Wang, I. V. Roshchin, R. Santamarta ve R. Arroyave, «On the microstructural origins of martensitic transformation arrest ina NiCoMnIn magnetic shape memory alloy,» Acta Materialia, cilt 142, pp. 95-106, 2018.

[7] M. Sullivan, A. Shah ve H. Chopra, «Pathways of Structural and Magnetic Transition in Ferromagnetic Shape Memory Alloys,» Physical Review B, cilt 70, pp. 1-8, 2003.

[8] D. Li, H. Garmestani, S. Yan, M. Elkawni, M. Bacaltchuk, H. Schneider-Muntau, J. Liu, S. Saha ve J. Barnard, «Effects of High Magnetic Field Annealing on Texture and Magnetic Properties of FePd,» Journal of Magnetism and Magnetic Materials, cilt 281, pp. 272-275, 2004.

[9] K. Oikawa, T. Ota, Y. Imano, T. Omori, R. Kainuma ve K. Ishida, «Phase equilibria and phase transformation of Co–Ni–Ga ferromagnetic shape memory alloy system,» Journal of Phase Equilibria and Diffusion, cilt 27, no. 1, pp. 75-82, 2006.

[10] R. Kainuma, Y. Imano, W. Ito, Y. Sutou, H. Morito, O. S., O. Kitakami, K. Oikawa ve A. Fujita, «Magnetic-Field-Induced Shape Recovery by Reverse Phase Transformation,» Nature, cilt 439, pp. 957-960, 2006.

[11] R. Kainuma, Y. Imano, W. Ito, H. Morito, Y. Sutou, K. Oikawa, A. Fujita, K. Ishida, S. Okamoto, O. Kitakami ve T. Kanomata, «Metamagnetic shape memory effect in a Heusler-type Ni43Co7Mn39Sn11 polycrystalline alloy,» Applied Physics Letters, cilt 88, no. 19, pp. 192513 - 192513-3, 2006.

[12] J. Monroe, J. Perez, C. Yegin, I. Karaman, A. Geltmacher, E. R.K. ve R. Kainuma, «Magnetic Response of Porous NiCoMnSn Metamagnetic Shape Memory Alloys Fabricated Using Solid-State Replication,» Scripta Materialia, cilt 67, p. 116–119, 2012.

[13] Z. Wu, Z. Liu, H. Yang, Y. Liu, G. Wu ve R. Woodward, «Metallurgical Origin of The Effect of Fe Doping on The Martensitic and Magnetic

Transformation Behaviors of Ni50Mn40-xSn10Fex Magnetic Shape Memory Alloys,» Intermetallics, cilt 19, pp. 445-452, 2011.

[14] T. Chabri, A. Awasthi, K. Ghosh, A. Venimadhav ve T. Nath, «Temperature and magnetic field dependent martensite transformation in Al doped Ni-Mn-Sn disorder alloys and its effects on magnetoresistance and magnetocaloric effect near room temperature,» Materials Research Express, cilt 5, no. 8, 2018.

[15] L. Ma, Q. S. Wang, Y. Li, M. C. Zhen, D. L. Hou, H. W. Wang, J. L. Chen ve H. Wu, «Martensitic and magnetic transformation in Mn50Ni50−xSnx ferromagnetic shape memory alloys,» Journal of Applied Physics, cilt 112, no. 8, 2012.

[16] Z. Han, J. Chen, B. Qian, P. Zhang, X. Jiang, D. Wang ve Y. Du, «Phase Diagram and Magnetocaloric Effect in Mn2Ni1.64xCoxSn0.36 Alloys,» Scripta Materialia, cilt 66, p. 121–124.

[17] P. Lazpita, M. Sasmaz, E. Cesari, J. Barandiaran ve J. Gutierrez, «Martensitic transformation and magnetic field induced effects in Ni42Co8Mn39Sn11 metamagnetic shape memory alloy,» Acta Materialia, no. 109, pp. 170-176, 2016.

[18] A. Turabi, P. Lázpita, M. Sasmaz, H. Karaca ve V. Chernenko, «Magnetic and conventional shape memory behavior of Mn-Ni-Sn and Mn-Ni-Sn(Fe) alloys,» Journal of Physics D: Applied Physics, no. 49, p. 205002, 2016.

[19] R. Khan, R. Ghomashchi, Z. Xie ve L. Chen, «Ferromagnetic Shape Memory Heusler Materials: Synthesis, Microstructure Characterization and Magnetostructural Properties,» Materials, cilt 11, no. 6, p. 988, 2018.

[20] A. Sanchez, V. Recarte, J. Landazabal, G. Polo ve J. Velamazan, «Role of magnetism on the martensitic transformation,» Acta Materialia, cilt 60, p. 459–468, 2012.

[21] K. Fukushima, K. Sano, T. Kanomata, H. Nishihara, Y. Furutani, T. Shishido, W. Ito, R. Umetsu, R. Kainuma, K. Oikawa ve K. Ishida, «Phase Diagram of Fe-Substituted Ni–Mn–Sn Shape Memory Alloys,» Scripta Materialia, cilt 61, p. 813–816, 2009.

[22] H. Luo, G. Liu, Z. Feng, Y. Li, L. Ma, G. Wu, X. Zhu, C. Jiang ve H. Xu, «Effect of The Main-Group Elements on The Electronic Structures and Magnetic Properties of Heusler Alloys Mn2NiZ (Z = In, Sn, Sb),» Journal of Magnetism and Magnetic Materials, cilt 321, p. 4063–4066, 2009.

[23] H. Liu, C. Zhang, Z. Han, H. Xuan, D. Wang ve Y. Du, «The Effect of Co Doping on The Magnetic Entropy Changes in Ni44−xCoxMn45Sn11 Alloys,» Journal of Alloys and Compounds, cilt 467, p. 27–30, 2009.

[24] C. L. Tan, Z. Feng, K. Zhang, M. Wu, X. H. Tian ve E. Guo, «Microstructure, martensitic transformation and mechanical properties of Ni–Mn–Sn alloys by substituting Fe for Ni,» Transactions of Nonferrous Metals Society of China, cilt 27, no. 10, pp. 2234-2238, 2017.

[25] Z. Wu, Z. Liu, H. Yang, Y. Liu ve G. Wu, «Metamagnetic Phase Transformation in Mn50Ni37In10Co3 Polycrystalline Alloy,» Applied Physics Letter, cilt 98, pp. 061904-1-11, 2011.