



ISSN:1306-3111

e-Journal of New World Sciences Academy
2011, Volume: 6, Number: 1, Article Number: 1A0167

ENGINEERING SCIENCES

Received: October 2010

Accepted: January 2011

Series : 1A

ISSN : 1308-7231

© 2010 www.newwsa.com

Ahmet Çetin Akis

Murat Eski

Eyyüp Seval

Kilis 7 Aralık University

ahmetcetinakis@hotmail.com

Hatay-Turkey

FARKLI ETKİLER ALTINDA ŞEKİL HATIRLAMALI CONİAL ALAŞIMLARININ MARTENSİTİK DÖNÜŞÜM SICAKLIKLARINDAKİ DEĞİŞİMLER

ÖZET

CoNiAl ve CoNiGa gibi Co bazlı şekil hatırlamalı alaşımlar ticari şekil hatırlama uygulamaları için kullanışlıdır. Co bazlı şekil hatırlamalı malzemelerin kullanım alanları sırasıyla uzay ve havacılık endüstrisi, otomotiv endüstrisi ve tıbbi uygulamalar olarak gruplandırılabilir. Özellikle mekanik araçlarda yay malzemesi, türbin motoru, robotik aletler ve klima sanayinde performans arttırıcı olarak tercih edilmektedir. Bu çalışmada şekil hatırlamalı Co bazlı alaşımların kompozisyonuna ve malzeme üzerine uygulanan deneysel işlemlere göre dönüşüm sıcaklıklarının değişimi bu konuda yapılmış literatür çalışmaları derlenerek incelendi. Şekil hatırlamalı Co bazlı alaşımlar üzerine yapılan araştırmaların incelemesi ile elde edilen sonuçlar özetlendi.

Anahtar Kelimeler: Martensitik Dönüşüm, Şekil Hatırlama Olayı, Co Bazlı Alaşımlar, Dönüşüm Sıcaklıkları, Alaşımlama Elementleri

THE CHANGES OF SHAPE MEMORY CONIAL ALLOYS UNDER DIFFRENT EFFECTS IN THE MARTENSITIC TRANSFORMATION TEMPERATURES

ABSTRACT

Co-based shape memory alloys such as CoNiAl and CoNiGa are suitable for commercial shape memory alloys applications. The uses of Co-based shape memory materials can be grouped as aerospace and aviation industry, automotive industry and medical applications. They are preferred as spreading material turbine engine, robotic instruments especially in mechanical tools and as performance enhances in air conditioning industry. In this work, the change of transformation temperatures dealing with the composition of Co-based shape memory alloys and experimental procedures performed on the materials was examined by compiling the literature studies performed in this field. The results, obtained by examining the searches on Co-based alloys were summarized.

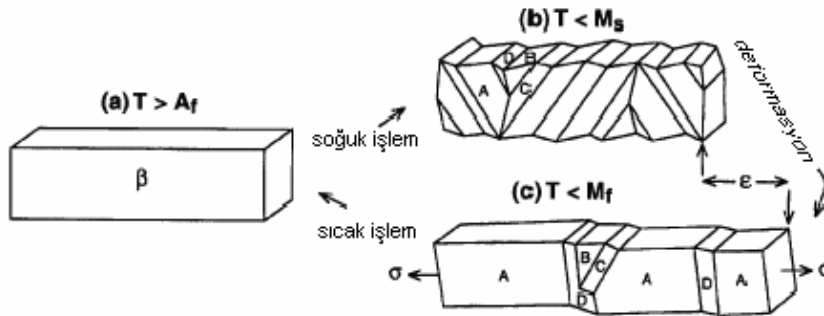
Keywords: Martensitic Transformation, Shape-Memory Event, Co-Based Alloys, Transformation Temperatures, Alloying Elements

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Şekil hatırlama olayının temeli olan martensitik faz dönüşümü, ilk olarak Alman metalürjist A. Martens tarafından demir esaslı alaşımlarda gözlenmiştir. Martensitik dönüşüm katılardaki bir katı-katı faz dönüşümünü ifade eder. Martensitik dönüşüm, difüzyonsuz olarak bir kristal yapıdan yeni bir kristal yapıya dönüşümle karakterize edilir. Difüzyonsuz martensitik dönüşümler çoğu metaller, alaşımlar ve bileşiklerde gözlenmiştir. Martensitik dönüşüm; bir örgü dönüşümü, kesme deformasyonunu ve atomik hareketi içine alır. Martensitik dönüşüm, metal ve alaşımlarda görülen birinci mertebeden bir yapısal faz dönüşümü olup austenit (ana) faza dışarıdan uygulanan sıcaklık ve zorun ayrı ayrı veya birlikte etkisiyle martensit (ürün) fazın elde edilmesi olayıdır [1].

Martensitik dönüşümler termoelastik ve termoelastik olmayan dönüşümler olmak üzere iki grupta incelenebilir. Bu iki dönüşüm arasındaki fark dönüşüm histerezisinden kaynaklanır. Termoelastik dönüşümlerde histerezis dar ve dönüşüm yüzdesi yüksek, termoelastik olmayan dönüşümlerde ise, histerezis geniş ve dönüşüm yüzdesi küçüktür. Termoelastik olmayan dönüşümde ise; soğutma sırasında oluşan bir martensit plakası belli bir büyüklüğe kadar gelir fakat soğutma devam etse dahi plakalarda büyüme olmaz. Sabitlenmiş ara yüzey ısıtma sırasında geri hareket etmez. Bunun yerine ana faz, sabitlenmiş martensit plakalar arasında çekirdeklenir ve bir plakanın tamamı orijinal ana faz yönelimine geri dönemez. Termoelastik olmayan faz dönüşümü, soğutma işlemi sırasında ani bir patlama reaksiyonuyla atermal olarak ana faz içinde yayılarak gerçekleşmektedir [3]. Termoelastik olmayan bir dönüşümle gerçekleşen martensitik yapı sıcaklık düşüşüyle büyümeyiz, fakat yeni martensit bölgeleri oluşur. Termoelastik dönüşümle oluşan martensitik yapılar ise süreklilik göstererek sıcaklık düşüşüyle büyürler. Şekil hatırlama olayı gösteren termoelastik faz dönüşümleri, düzenli bir yüksek sıcaklık fazından yani yüksek simetri fazından, kristalografik olarak tersinir bir termoelastik dönüşüm ile düşük sıcaklık fazına, yani düşük simetri fazına bir geçiş gösterir [1].

Şekil hatırlamalı alaşımlar genel olarak termoelastik faz dönüşümü sergilerler. Çünkü bu alaşımların büyüme kinetikleri ve dar histerisize sahip olmaları, şekil hatırlama olayı için gereklidir. M_s , martensit başlama sıcaklığında başlayan martensit plakaların oluşması, M_f martensit bitiş sıcaklığında %100 martensit plakaların oluşumu ile son bulur. Bunun tersine, ısıtma ile beraber A_s , austenit başlama sıcaklığı ile başlayan ana faza geçiş, A_f , austenit bitiş sıcaklığı ile son bulur. Şekil 1. martensit dönüşüm mekanizmasını şematik olarak göstermektedir. Şekil 2. ise, martensit dönüşümü göre şekil hatırlama sürecini göstermektedir.

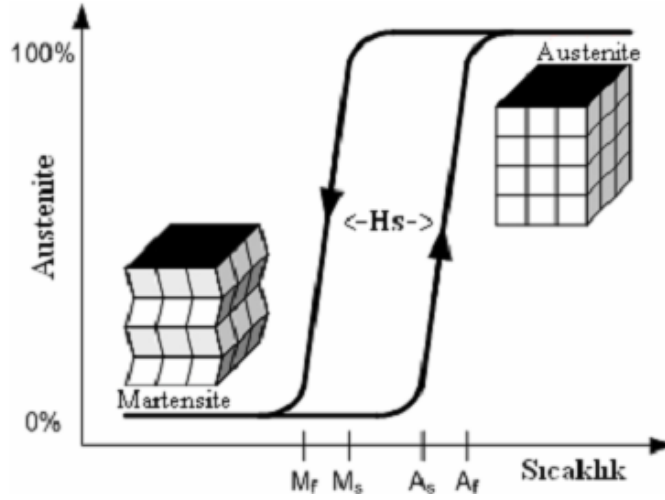


Şekil 1. Martensitik dönüşüm

- a) Austenit fazda β fazlı kristal, b) Martensitik dönüşüm sonrasında oluşan ikizlenme A, B, C ve D varyantları, c) Baskın A varyantı [1]

(Figure 1. Martensitic transformation)

- a) β -phase crystals in austenite phase b) The twinning of martensitic transformation in the A, B, C and D variants, c) The dominant A variant[1])



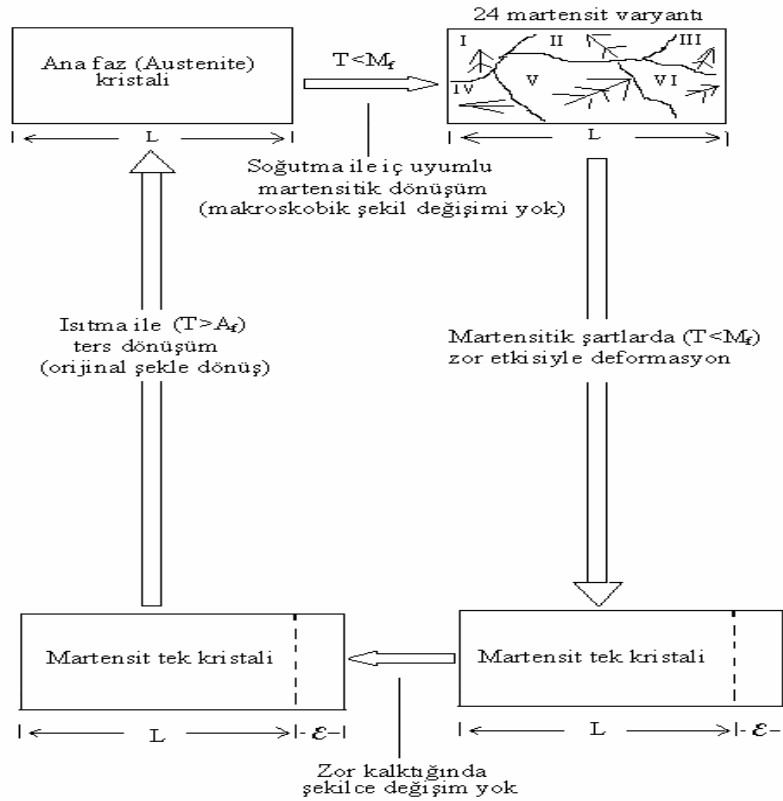
Şekil 2. Sıcaklık değişim ve martensitik dönüşüme bağlı histerisiz (H) değişim grafiği [6]

(Figure 2. Martensitic transformation due to changes in temperature and hysteresis (H) exchange graph[6])

Bazı alaşımların, sıcaklığın değiştirilmesi ve zorlanma etkisi ile şekillerini değiştirmesi ve ters dönüşümle tekrar eski şeklini alması olayı (Shape Memory Effect) günümüzde endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır. Termoelastik martensit dönüşümleri ve buna bağlı olarak da Şekil hatırlama olayı ilk olarak 1938 lerde gözlemlendi. Bu olay 1951 yılında AuCd alaşımın ve 1953 de InTi alaşımında gözlemlenmiştir, ancak şekil hatırlama olayının uygulamalarda kullanılması, 1963 yılında eşit atomik yüzdeleri NiTi alaşımında gerçekleşmiştir. Daha sonraki araştırmalarda büyük ölçüde soymetal bakır bazlı alaşımlarda ve başka alaşımlarda da bu olayın gerçekleştiği gözlemlenmiştir (Kayalı, 1993). Şekil hatırlama olayının bir sonucu olarak, martensite→austenite (M→A) ters dönüşümü esnasında kullanılabilir bir kuvvet açığa çıkar. Termal çevrimleme sonucunda, şekillerini kendiliklerinden ve tersinir olarak geri kazanabilme özellikleri yanında kullanılabilir kuvvet üretebilmeleri nedeniyle, bu alaşımlar teknolojik ilginin odağı haline gelmiş ve üzerinde çok sayıda araştırmalar yapılmıştır. Bu nedenle, şekil hatırlamalı alaşımların kullanılmasıyla bir grup cihazın dizaynı gerçekleştirilebilmiştir [1].

Şekil hatırlama olayı; malzemenin düşük sıcaklıklarda şeklinin belli oranlarda deforme edilmesine rağmen, yüksek sıcaklıklarda orijinal şekline dönebilmesi olarak tanımlanır. Şekil hatırlama etkisi alaşımın termoelastik dönüşüm sergileyebilmesi ile ilgilidir. Termoelastik dönüşümlerde sadece orijinal kristal yapı ve yönelimi eski halini almakla kalmayıp mikroyapı da eski halini hatırlar. Bu tür dönüşümlerde, sıcaklık düşürüldükçe martensit plakaları oluşup büyürler. Bu plakalar soğutma işleminin devam etmesiyle birbirlerine ya da tane sınırına ulaşıncaya kadar büyümeye devam ederler. Sıcaklık yükseltildiğinde ise ara yüzeyin geri hareketiyle martensitik oluşumlar büzülerek ana faza dönüşür [7].

Şekil hatırlama olayı gözlemlenmeyen martensitik dönüşümlerde ise soğutma sırasında oluşan martensit plakalarının büyüme yüzdesi sınırlıdır. Oluşan bu martensit plakalar, yapı içinde sabitlenmiş olarak kalır. Malzeme ısıtılrsa dahi oluşan plakalar austenit faza dönüşmez. Şekil hatırlamanın gözlemlenmesi için dönüşüm yüzdesinin yüksek olması gereklidir. Sonuç olarak termoelastik dönüşüm sergilemeyen bu tür malzemeler şekil hatırlama etkisi gösteremez.



Şekil 3. Şekil hatırlama olayının mekanizması [7]
(Figure 3. SME realization in a single crystal[7])

Şekil hatırlama özelliği, malzeme martensitik fazda iken deforme edilip, daha sonra austenit faz sıcaklığına kadar ısıtıldığında, austenit fazda iken sahip olduğu ilk şeklini hatırlaması olayıdır. Malzemenin deformasyonundan sonra düzeliş ilk şeklini alması malzemenin önemli bir yeteneğini ifade eder. Şekil hatırlama etkisinin ortaya çıkmasına, ısıtma veya soğutma işlemleri süresince belirli bir sıcaklık aralığında oluşan yapısal değişimler neden olmaktadır.

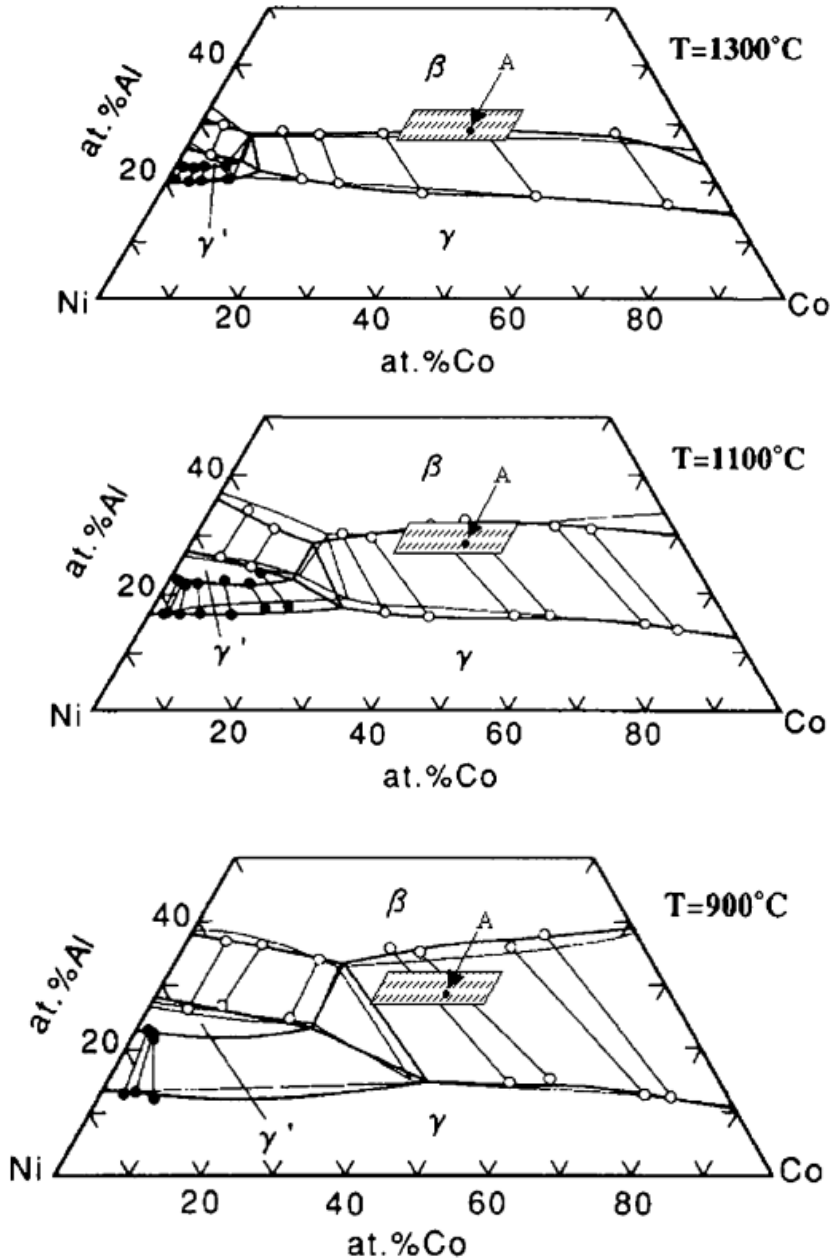
2. ÇALIŞMANIN ÖNEMİ (RESEARCH SIGNIFICANCE)

CoNiAl ve CoNiGa gibi Co bazlı şekil hatırlamalı alaşımlar ticari şekil hatırlama uygulamaları için kullanışlıdır. Co bazlı şekil hatırlamalı malzemelerin kullanım alanları sırasıyla uzay ve havacılık endüstrisi, otomotiv endüstrisi ve tıbbi uygulamalar olarak gruplandırılabilir. Özellikle mekanik araçlarda yay malzemesi, türbin motoru, robotik aletler ve klima sanayinde performans arttırıcı olarak tercih edilmektedir. Bu çalışmada şekil hatırlamalı Co bazlı alaşımların kompozisyonuna ve malzeme üzerine uygulanan deneysel işlemlere göre dönüşüm sıcaklıklarının değişimi bu konuda yapılmış literatür çalışmaları derlenerek incelendi. Şekil hatırlamalı Co bazlı alaşımlar üzerine yapılan araştırmaların incelenmiştir.

3. CO BAZLI ALAŞIMLARDA FAZ DİYAGRAMLARI (PHASE DİYAGRAMS IN CO BASED ALLOYS)

Şekil 5'de CoNiGa alaşımının faz diyagramı verilmiştir. Bakır bazlı diğer alaşımlarda olduğu gibi CoNiGa alaşımlarında şekil hatırlama olayı görülen kompozisyon aralığı, yüksek sıcaklıklardaki β faz bölgesidir. Yüksek sıcaklık bölgelerinde ağırlıkça Ga kompozisyonu civarında bcc yapı β faz bölgesi vardır. Şekil 6'da de görüldüğü gibi CoNiAl sisteminde Al

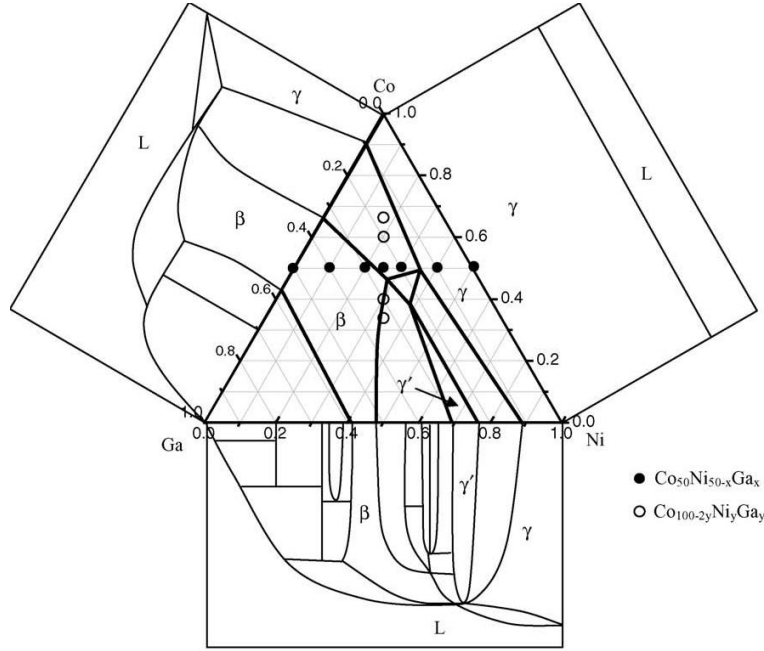
oranı arttırıldığında β faz bölgesinden uzaklaşılır, termoelastik martensitik dönüşüm ortaya çıkmaz ve γ' fazının çökmesi hızlı soğutmayla da önlenemeyebilir.



Şekil 4. CoNiAl alaşımlarının faz diyagramları [4]
(Figure 4. Phase diagrams of CoNiAl alloys[4])

CoNiAl alaşımları, geniş bir sıcaklık ve kompozisyon aralığında β fazı ile kararlı olan Al tip γ fazına sahiptir. γ fazının miktarı biçimi ve dağılımı martensitik dönüşüme büyük bir etki yapar. CoNiAl sistemleri, kompozisyona bağlı olarak β austenit (B2 kübik) fazından, $L1_0$ (tetragonal) martensite dönüşürler. Polikristal malzemede tek β fazı son derece sert ve gevrek ama yüzey merkezli kübik yapıya sahip olan β fazı (fcc) ikincil γ fazı sünektir. Yüksek sıcaklıklardan soğuma ile CoNiAl alaşımları termoelastik martensitik dönüşümüyle paramagnetik yapıdan ferromagnetik yapıya geçerler.

Şekil hatırlama olayını sergileyen CoNiGa alaşımının faz diyagramı Şekil 5 'de verilmektedir. CoNiGa sisteminin denge faz diyagramı, düşük sıcaklıklarda Ni'in atomik içeriğinin bir fonksiyonu olarak, düşük sıcaklıklarda beş farklı bölge içermektedir [9].



Şekil 5 CoNiGa alaşımının faz diyagramı [4]
(Figure 5. Phase diagrams of CoNiGa alloys [4])

4. FARKLI ETKİLER ALTINDA ŞEKİL HATIRLAMALI CONİAL ALAŞIMLARININ MARTENSİTİK DÖNÜŞÜM SICAKLIKLARINDAKİ DEĞİŞİMLER (THE CHANGES ON MARTENSITIC TRANSFORMATION TEMPERATURES OF SAHPE MEMORY CONIAL ALLOYS UNDER DIFFERENT EFFECTS)

Şekil hatırlamalı alaşımlar için faz dönüşüm sıcaklıkları çok önemli parametrelerdir. Bu dönüşüm sıcaklıklarından özellikle M_s sıcaklığının oda sıcaklığı civarında olması çok önemlidir. Faz dönüşüm sıcaklıkları genel olarak mikroyapı farklılıkları ve malzemeye uygulanan farklı işlemlerden etkilenebilirler (Eskil., 2006). Co-Ni-Al alaşımlarında M_s sıcaklığı, tavlama sıcaklığı arttıkça yükselir [8].

Yapısal dönüşümün yanında, Co-Ni-Al alaşımlarında paramagnetik düzenden antiferromagnetik düzene magnetik bir dönüşüm söz konusudur. Bu dönüşümün gerçekleştiği sıcaklığa Curie sıcaklığı (T_c) adı verilir. T_c sıcaklığının, M_s sıcaklığına göre durumu dönüşüm davranışını ve şekil hatırlama etkisini değiştirebilir. CoNiAl alaşımları için Paramagnetizma-antiferromagnetizma dönüşümü, ikinci dereceden bir dönüşüm olduğundan (hacim genişlemesi vb. sonuçlar yoktur) uygulanan zor ile ilişkisi yoktur. Bu yüzden uygulanan zor direkt olarak dönüşümü etkiler.

Kobalt esaslı alaşımların dönüşüm sıcaklıkları, alaşımların soğutma hızına bağlı olduğu kadar kompozisyonlarına da bağlıdır. Şekil 6'da Co-Ni-Al alaşımlarında dönüşüm sıcaklıklarının Al konsantrasyonuyla değişimi verilmiştir. Al konsantrasyonu arttıkça dönüşüm sıcaklıklarının azaldığı görülmektedir [10]. Şekil 6. (a)'da görüldüğü gibi şekil hatırlamalı Co bazlı alaşımlarda Ni ile Al konsantrasyonunun azalması ile T_c sıcaklığı artar, Ni ile Al konsantrasyonunun artması ise M_s sıcaklığını azaltacak bir şekilde sonuç verir. Şekil 6. (b)'de görüldüğü gibi T_c sıcaklığı yaşlandırma sıcaklığı arttırıldıkça artış gösterir.

Bu tür alaşımlarda Al miktarındaki değişim Ni miktarındaki değişime göre martensitik dönüşüm sıcaklıklarını daha fazla etkiler. Örneğin Al %1 artırıldığında yada azaltıldığında martensitik dönüşüm sıcaklığı 10 °C değişirken, Ni miktarındaki %1 değişim martensitik dönüşüm sıcaklığını ancak 2 °C değiştirir. Bu tür alaşımlar için termodinamik denge sıcaklığı ise

$$T_0 = \frac{(M_s + A_f)}{2} \quad (1)$$

formülü ile verilir [8].

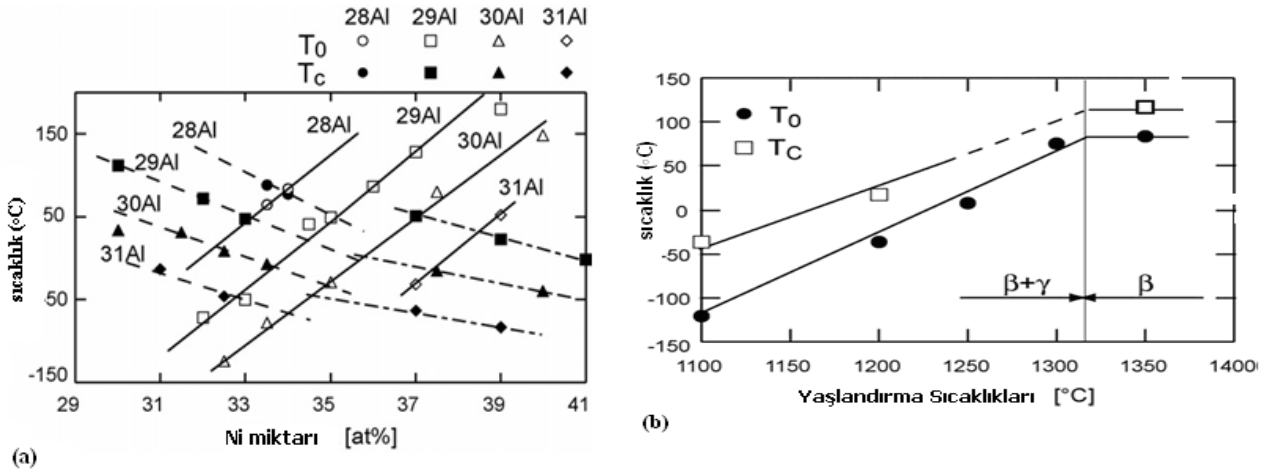
Xu ve arkadaşları martensitik dönüşüm sıcaklığı olarak T_m kavramını ve T_m için ise $T_m = (A_s + M_s)/2$ ifadesini kullanmışlardır [12]. β fazlı Co-Ni-Al alaşımları $B_2 \rightarrow L1_0$ faz dönüşümü gösterir. Ortamın sıcaklığı yükseltildiğinde faz dönüşümü magnetik alandan etkilenir ve ferromagnetik şekil hatırlamalı alaşımlar üretilmiş olur. Malzemeye Al yanında Sb eklenmesi ile soğutma işlemi yapıldığında martensitik dönüşüm sıcaklıklarında azalma meydana gelir. Martensitik dönüşüm sıcaklık aralığı

$$\Delta T_m = \frac{(M_s - M_f) + (A_s - A_f)}{2} \quad (2)$$

formülü ile verilir [12].

Bu sıcaklık aralığı değeri ferromagnetik şekil hatırlama olayının gerçekleşmesinde önemli bir faktördür.

Co bazlı alaşımlarda Al konsantrasyonundaki değişim sonucunda A_s ve M_f sıcaklıkları değişse de $A_s - M_f$ sıcaklık farkının 20 °C olduğu görülmektedir. Bu durumun böyle olmasını etkileyen iki faktör vardır. Birincisi atom konsantrasyonları, ikincisi birim hücre hacmidir. Şekil 8'de görüldüğü gibi Al ve Ga aynı valans elektronu sayısına sahip olmasına rağmen Ga göre Al eklenmesi atomun hacminde bir değişim oluşturur. Bu değişim birim hücrelerindeki genişlemeden dolayıdır. Bu genişlemeden dönüşüm sıcaklıkları da etkilenir. Burada alaşıma Al eklenip, Ga çıkartılırsa alaşımın atomik yarıçapını büyüterek örgünün genişlemesine sebep olur. Bu genişlemeden dolayı M_s sıcaklığı düşer [11].



Şekil 6. Co-Ni-Al alaşımlarında

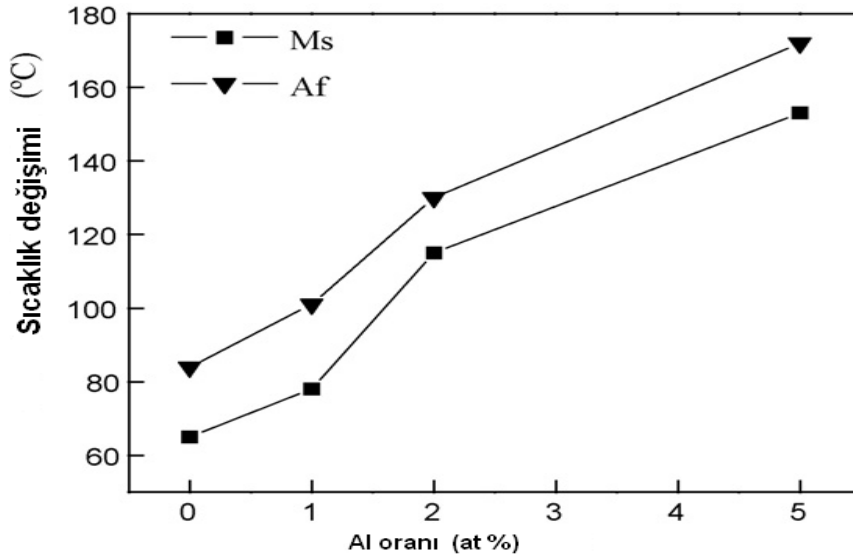
a) Ni konsantrasyonuna bağlı olarak Termodinamik denge ve Curie sıcaklıklarının değişimi b) yaşlandırma sıcaklıklarına karşı T_0 ve T_c sıcaklıklarının durumu [8]

(Figure 6. Co-Ni-Al alloys

a) Changes on thermodynamic equilibrium and Curie temperatures depending on Ni concentration b) T_0 and T_c temperatures versus aging temperature of CoNiAl alloys [8])

Co bazlı alaşımlarda Ni ve Al oranı azaldıkça T_c değerinde artış görünür. T_c ve M_s sıcaklığı tavlama sıcaklığının değişimi ve kimyasal kompozisyonun değişimine bağlıdır. Hem martensitik dönüşüm sıcaklığı T_m hem de curie sıcaklığı T_c soğutma sıcaklığı ile lineer bir ilişki içindedir. Her 10 °C artan soğutma sıcaklığı ile T_m değeri 9 °C, T_c değeri ise 7,5 °C artar.

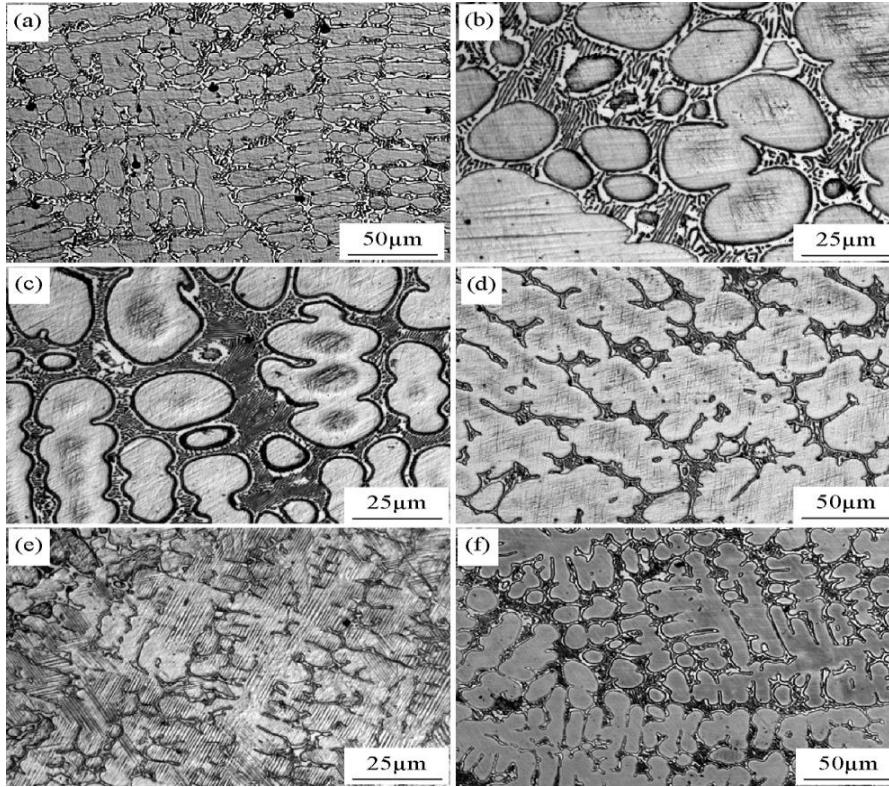
Co bazlı alaşımlarda tavlama sıcaklığı yada zamanı arttırılırsa martensitik dönüşüm sıcaklıkları düşer. Bu tür alaşımlarda Ni oranı arttırılırsa martensitik dönüşüm sıcaklıkları artar. Örneğin Ni miktarı %1 arttırılırsa martensitik dönüşüm sıcaklıkları 30 °C ile 60 °C arasında artarken β çözültisi ayrışma sıcaklığı çok az değişir. Co miktarı sabit tutulup Al miktarı azaltılırken Ni miktarı artması durumunda ise difüzyon ayrışması ve martensitik dönüşüm sıcaklıklarının da çok daha büyük değişimler olur. Örneğin Ni miktarı %1 arttırılırsa, difüzyon ayrışma sıcaklığı 20 °C ile 30 °C aralığında düşer. Martensitik dönüşüm sıcaklıkları arasındaki farkda değişim gösterir, M_s-M_f ile A_s-A_f arasında ki fark 45 °C ile 75 °C arasında değişirken A_f-M_f arasında ki fark 90 °C ile 110 °C arasında olmaktadır.



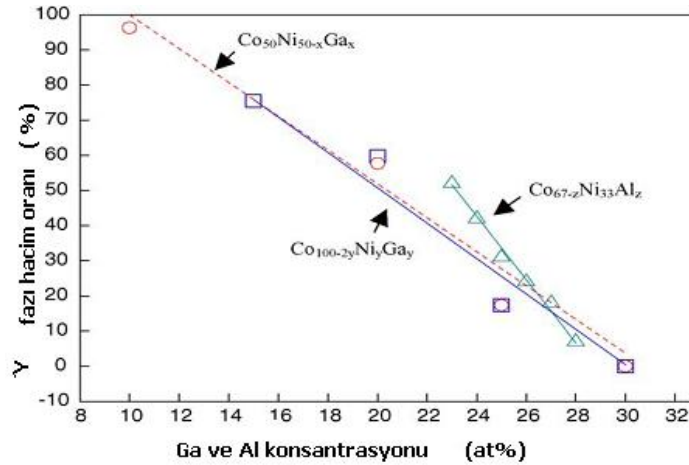
Şekil 7. CoNiAl alaşımlarında Al oranına bağlı olarak sıcaklık değişimleri [11]

(Figure 7. Temperature changes depending on Al concentration of CoNiAl alloys [11])

Tablo 1 'de Liu ve arkadaşlarının Co-Ni-Al alaşımları üzerine yapmış olduğu çalışmada görüldüğü gibi 4, 5, 6, 7 numaralı numuneler için martensitik dönüşüm sıcaklıklarının düşük olduğu tesbit edilmiştir. Bu çalışma sonucu elde edilen metalografik fotoğraflarda görüldüğü gibi numuneler üzerinde martensit plakaları oluşmuştur. Şekil 7'de yüksek sıcaklıkta homojenize edilen numuneler oda sıcaklığında soğutulduğundan sonra elde edilen metalografik gözlemlerde martensitik yapılarında anlaşıldığı üzere numunelerin M_s sıcaklıklarının oda sıcaklığının üzerinde olduğu görülmektedir.



Şekil 8. CoNiAl alaşımlarının optik fotoğrafları [4]
(Figure 8. Optical micrographs of as-cast Co-Ni-Al alloys [4])



Şekil 9. Co bazlı alaşımlarda Ga ve Al konsantrasyonuna bağlı olarak atom hacmi değerlerinin değişimi [10]
(Figure 9. Change of atomic volume values depending on Ga and Al concentration in Co based alloys [10])

Uzun periyotlu yığılma düzenine sahip martensitler termoelastik davranış gösterir ve genellikle düzenli yapıdaki austenit fazdan dönüşürler. 1,40 ve 1,50 arasında elektron konsantrasyonu olan alaşımların martensitik dönüşüm öncesindeki β ana fazları elektron fazı olarak da adlandırılır. Elektron /Atom (e/a) oranı, elektron konsantrasyonudur. Yani

alaşımında atom başına ortalama serbest (valans) elektron sayısıdır. e/a oranı aşağıdaki formül ile hesaplanır;

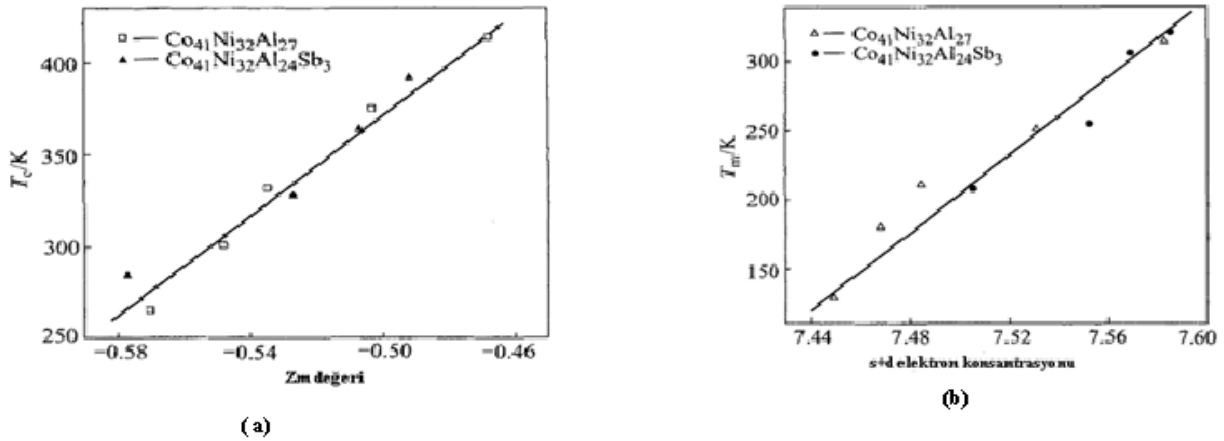
$$e/a = \sum_i (\text{valans})_i x (\text{atomik oran})_i$$

burada; i ; alaşımlardaki elementlerin toplamını gösterir [6].

Örneğin; atomik %38.5 Co- % 32.5 Ni-% 28Al oranına sahip alaşım için elektron konsantrasyonu (Co-2, Al-3, Ni-2 değerlikli olduğundan); bu verilere göre Co-Ni-Al kompozisyonu için $e/a = 7.58$ olur. Co bazlı alaşımlarda e/a oranı önemli bir veridir. Bu oranın artırılması ile A_s ve M_s sıcaklıkları da düzenli bir şekilde artış gözlenir [10].

Ferromagnetik şekil hatırlama olayında önemli olan ikinci bir etkende zor ile elde edilen martensitik dönüşüme dış magnetik alan uygulanarak şekil değişimi elde etmektir. Zor etkili martensitik dönüşüm yalnızca M_s sıcaklığının biraz üstündeki sıcaklıkta meydana gelir. Uygulama sıcaklığı arttırıldığında martensitik dönüşüm oluşmazsa, uygulanan zor arttırılır ve martensitik dönüşüm gerçekleşmiş olur.

Martensitik faz dönüşüm sıcaklığının değişimi, s+d orbitallerinin elektron toplamı e/a ifadesi ile açıklanabilir. Co, Ni, Al ve Sb'nin s+d elektron sayıları toplamı 9, 10, 3 ve 5 dir. Bu numunenin T_m sıcaklığı ve soğutma sıcaklığı arasındaki ilişki e/a oranının değişimi ile açıklanabilir. Şekil 10'da görüldüğü gibi e/a oranındaki artış ile T_m sıcaklığı da lineer bir şekilde artış gösterir. Co elementinin s+d elektron numarası, Al'dan daha fazla olduğundan, Co içeriğinin yüksek olduğu fazlarda e/a oranı da yüksek olur, dolayısıyla T_m sıcaklığı da artar. T_c sıcaklığı da kimyasal kompozisyon ve faz düzen derecesine göre değişim gösterir. Atomların komşuluk ve arkadaşlıklarının düzen derecesi ise numunenin kristal yapısı ile orantılıdır. Şekil de gösterildiği gibi alaşımın T_c sıcaklığı, T_m sıcaklığından daha yüksektir. Xu. ve arkadaşlarının çalışmalarında kullanılan alaşımlar da B2 ana faz yapısı hakimdir. Magnetik dönüşüm gerçekleştiğinde tüm alaşım numunelerinin atomik düzen ve dereceleri aynı olur. Bu nedenle T_c sıcaklığının β faz kimyasal yapısına bağlı olduğu söylenebilir. Son zamanda yapılan bazı çalışmalarda T_c sıcaklığının magnetik valans elektron sayısı (Z_m) ile ilgili olduğu tespit edilmiştir. Co, Ni, Al ve Sb'nin Z_m değerleri sırası ile 1, 0, -3, -5 dir.. Ayrıca T_c - Z_m eğrisi Şekil 10'da verilmiştir ve Z_m 'nin T_c ile orantılı olduğu kolaylıkla görülmektedir. Co bazlı alaşımlarda artan Co ve azalan Al miktarına göre Co ve Al 'un Z_m değerlerinin sırası ile 1 ve -3 olması dolayısı ile Z_m ve T_c değerlerinde artış gözlenir. $Co_{41} Ni_{32} Al_{24} Sb_3$ alaşımının T_c değeri $Co_{41} Ni_{32} Al_{27}$ alaşımından 18 °C daha yüksektir, ancak her ikisinin de yüksek sıcaklıktan itibaren soğutma sıcaklıkları aynıdır. Bu durum Sb'nin Z_m değerlerindeki değişim ile açıklanamaz, çünkü Sb'nin Z_m değeri -5 'dir ve Al'un Z_m değerinden düşüktür. Eğer β fazındaki Co ve Ni içerikleri sabit olursa yalnızca Al kompozisyonu ile Sb kompozisyonu arasında bir değişim olur, buda artan Z_m değerlerinin azalmasına yol açacaktır ve sonuçta T_c değeri azalacaktır. Sb içeren alaşımın ΔT_m değeri 22-29 °C aralığında iken Sb kullanılmayan alaşımın ΔT_m değeri 40-55 °C arasındadır. Bu sonuç iki alaşım arasındaki ΔT_m farkının iki katı olduğunu gösterir. Aynı şekilde Sb içeren alaşımın T_m değeri, diğerinden 76 °C ve T_c değeri ise 18 °C daha yüksektir.

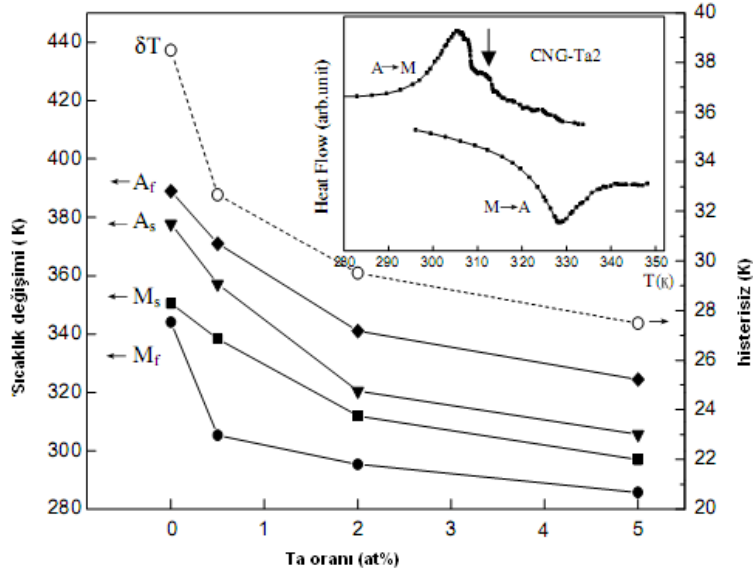


Şekil 10. Co bazlı alaşımlarda Al ve Sb konsantrasyonuna bağlı olarak (a) T_c - Z_m ve (b) T_m -s+d değerlerinin değişimi [12]
(Figure 10. Change of the a) T_c - Z_m and b) T_m -s+d depending on Al and Sb concentration of Co based alloys [12])

Liu ve arkadaşlarının DSC analizlerinden aldığı sonuçlar doğrultusunda martensitik dönüşüm sıcaklıkları M_s , M_f , A_s , A_f ve δT ($A_f - M_s$) değerlerinin malzeme içerisindeki Ta miktarındaki artışla azaldığı görülmüştür (Şekil 11). Şekilde verilen DSC eğrisinde okla gösterilen bölgedeki küçük pik görüntüsü martensit faz oluşumunun tam yerine oturması esnasında görülebilir. Bu durum bu çalışmadaki malzemenin 127 °C de yaşlandırılması sonucu elimine edilebilir [4].

Genellikle martensitik dönüşüm sıcaklıklarına etki eden 3 ana faktör vardır. Bunlar;

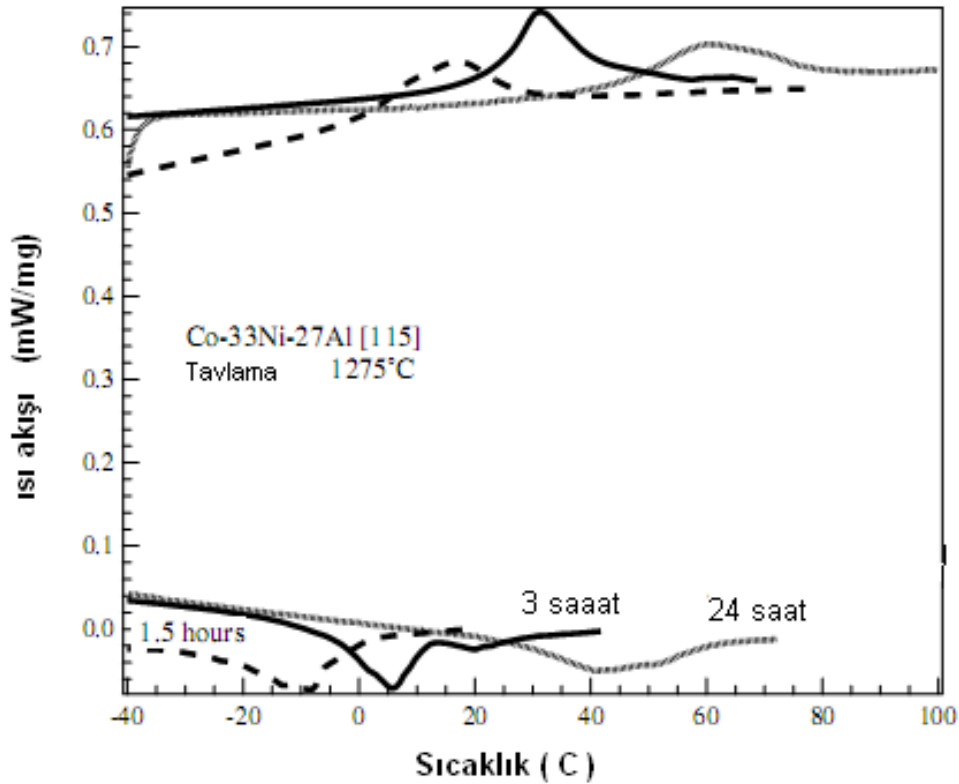
- Matrisin kompozisyona bağlı elektron konsantrasyonu
- Atom büyüklük faktörü
- Çökelti fazları



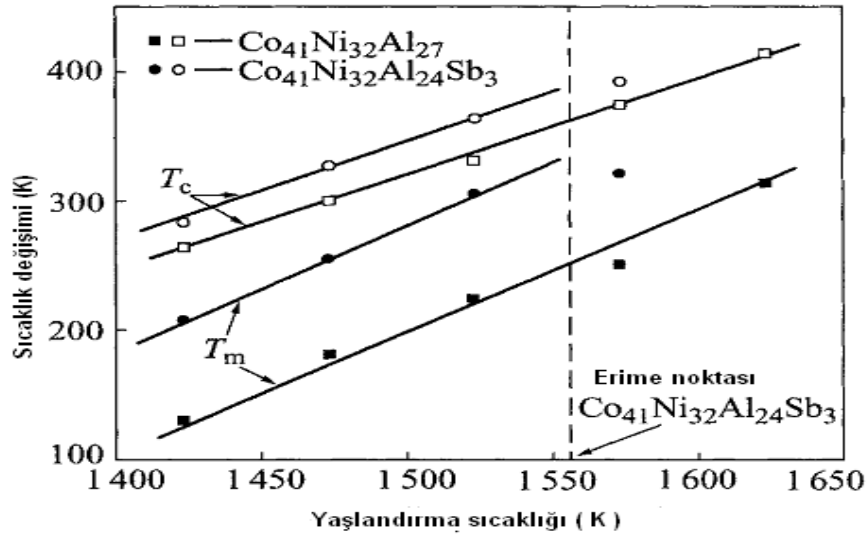
Şekil 11. Co bazlı alaşımlarda Ta oranına bağlı sıcaklık ve histerisiz ilişkisi [13]

(Figure 11. Ta temperature and hysteresis change of Co-based alloys depending on Ta concentration [13])

Malzemeye Ta atomlarının katılması birim örgü hacminde bir genişlemeye yol açar; bu durumda martensitik dönüşüm sıcaklıklarında bir azalma görülür. Ta'un atom çapı 0,148 nm 'dir. Malzemenin tane büyüklüğü ve tane sınırlarının da geniş olması M_s sıcaklığını düşürmek için kullanılabilecek önemli bir faktördür. Ana fazın güçlendirilmesi mekanizmanın martensitik dönüşüm sürücü kuvvetini arttıran ve M_s sıcaklığını da azaltan bir sonuç getirir. Martensit fazının örgüsünün c parametresinin a örgü parametresine oranı ile M_s sıcaklığı arasında orantılı bir ilişki olduğu saptanmıştır. Bu ilişki şu şekilde ifade edilebilir; Martensit fazının e/a oranının küçük olması, örgü deformasyonunun da az olduğunu gösterir. Bu durum ise dönüşüm esnasında enerji değişikliğinin de küçük olmasına yol açar; bu küçük enerji değişikliği de martensitik dönüşüm sıcaklığını azaltacak şekilde malzemeyi etkiler. Dislokasyonlar ve kalıcı martensit zor alanları M_s sıcaklığını malzeme üzerinde yapılacak her bir işlem döngüsü için arttıracaktır.



Şekil 12. Co bazlı alaşımlarda tavlama sıcaklığı ısı akışı arasındaki ilişki [14]
(Figure 12. Differential scanning calorimetry results for annealing at 1275 C for different times [14])



Şekil 13. Co bazlı alaşımlarda tavlama sıcaklığı ile T_m ve T_c arasındaki ilişki [15]

(Figure 13. Relationship between T_m , and T_c , with annealing temperature [15])

Hamilton ve arkadaşları yapmış oldukları çalışmalarda, 1275 °C'de yapılan tavlama sonucunda termal histerisinin 25 °C olduğu ve martensitik dönüşüm sıcaklıklarının artan tavlama süresi ile arttığı görülmüştür.

Şekil hatırlamalı alaşımlarda martensitik dönüşümün termoelastik olması; alaşımda sıcaklığın düşmesi ile martensit plakaların oluşması ve büyümesi, sıcaklığın artması ile ise büyüme yönünün tam tersi yönde kaybolması olarak açıklanabilir. Bu alaşımlarda yüksek sıcaklıkta kararlı olan austenit fazı ve düşük sıcaklıkta kararlı olan farklı bir kristal yapısına sahip martensit fazı bulunmaktadır. Co bazlı alaşımlarda $A_s - M_s$ arasındaki fark ne kadar az ise alaşımların termoelastiklik özelliği o kadar kalitelidir (Liu ve ark. 2004).

Tablo 1. Co bazlı Alaşımların ΔT_m , T_m , ΔT_c değerleri [14]

(Table 1 ΔT_m , T_m , ΔT_c values of Co-based alloys [14])

Alaşım	Yaşlandırma Sıcaklığı	Martensitik Dönüşüm Sıcaklığı (°C)				$\Delta T_m / ^\circ K$	$T_m / ^\circ K$	$\Delta T_c / ^\circ K$
		M_s	M_f	A_s	A_f			
$Co_{41}Ni_{32}Al_{27}$	1150			-183	-134	47*	129*	265
	1200			-132	-83	49*	180*	301
	1250	-54	-93	-85	-43	40	224.5	332
	1300	-41	-79	-44	-3	39,5	251	375
	1350	29	-25	-1	54	54.5	314.5	414
$Co_{41}Ni_{32}Al_{24}Sb_3$	1150	-83	105	-73	-47	24	208	284
	1200	-34	-57	-24	-2	22.5	255	328
	1250	20	-2	24	47	22.5	306.5	364
	1300	34	7	31	62	29	321.7	392

$$\Delta T_m = (M_s - M_f + 4rA_s) / 2; T_m = (A_s + M_s) / 2$$

Tablo 2. Co-Ni-Al alaşımların kompozisyona ve malzeme üzerine uygulanan işlemlere göre dönüşüm sıcaklıkları
(Table 2. Transformation temperatures depending on composition and treatments performed on the CoNiAl materials)

Sıra	Ref	Co	Ni	Al	Ga	sb	YAPILAN İŞLEM	M _s	M _f	A _s	A _f	T _c
		%at	%at	%at	%at	%at		(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)
1	22	49	21		30		YÜK ALTINDA ISITMA VE SU İLE SOĞUTMA 127 C	-27	-29	-8	-6	-
2	22	40	33	27			YÜK ALTINDA ISITMA VE SU İLE SOĞUTMA 127 C	-7	-28	2	25	-
3	4	41	32	27			YAŞLANDIRMA 1 SAAT SÜRE İLE (150)C	-	-	-173	-134	53
4	4	41	32	27			YAŞLANDIRMA 1 SAAT SÜRE İLE 200 C	-	-	-132	-83	28
5	4	41	32	27			YAŞLANDIRMA 1 SAAT SÜRE İLE 250 C	-54	-93	-85	-53	59
6	4	41	32	27			YAŞLANDIRMA 1 SAAT SÜRE İLE 300 C	-41	-79	-44	-3	102
7	4	41	32	27			YAŞLANDIRMA 1 SAAT SÜRE İLE 350 C	29	-25	-1	54	141
8	4	41	32	24		3	YAŞLANDIRMA 1 SAAT SÜRE İLE 150 C	-83	-105	-73	-47	11
9	4	41	32	24		3	YAŞLANDIRMA 1 SAAT SÜRE İLE 200 C	-34	-57	-24	-2	55
10	4	41	32	24		3	YAŞLANDIRMA 1 SAAT SÜRE İLE 250 C	20	-2	24	47	91
11	4	41	32	24		3	YAŞLANDIRMA 1 SAAT SÜRE İLE 300 C	34	7	31	62	119
12	23	49	21		30		YÜK ALTINDA ISITMA VE SU İLE SOĞUTMA 127 C	-10	-5	8	13	-
13	1	37	34	29			TAVLAMA VE SU İLE SOĞUTMA 1350 C 24 SAAT	-101	-	-	-	2
14	1	37	34	29			TAVLAMAVE SU İLE SOĞUTMA(1200 C) 24 SAAT	-	-	-	-	23
15	5	54,2	22		25,6		YÜK ALTINDA ISITMA VE SU İLE SOĞUTMA 127 C	-10	-5	8	13	-
16	6	45	25		30		SU İLE SOĞUTMA (127 C- 77 C)YE	77.5	71.1	104.7	116	
17	6	44,5	25		30		SU İLE SOĞUTMA (127 C- 77 C)YE	106.6	98.5	127.8	142.5	-
18	6	44	25		30		SU İLE SOĞUTMA (127 C- 77 C)YE	120	115,9	142.4	155.1	-
19	6	43,5	25		30		SU İLE SOĞUTMA (127 C- 77 C)YE	129	121,4	154.4	163.6	-
20	20	38	33	29			TAVLAMA VE SU İLE SOĞUTMA 1350 C 24 SAAT	-	-	-	-	7
21	20	38.5	33.5	28			TAVLAMA VE SU İLE SOĞUTMA 1350 C 24 SAAT	-16	-51	-33	-8	125
22	19	35	40	25			TAVLAMA VE SU İLE SOĞUTMA 1250C	167	-	-	-	-
23	19	40	35	25			TAVLAMA VE SU İLE SOĞUTMA 1250C	-	-	-	-	130
24	18	1.28	1.17	x			YÜK ALTINDA ISITMA VE SU İLE SOĞUTMA 123 C	175	90	152	205	-
25	17	39	33	28			TAVLAMA (673-873)K SU İLE SOĞUTMA	-	-	-	-	105
Sıra	Ref	Co	Ni	Al	Ga	sb	YAPILAN İŞLEM	M _s	M _f	A _s	A _f	T _c
		%at	%at	%at	%at	%at		(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)
26	17	37	34	29			TAVLAMA (673-873)K SU İLE SOĞUTMA	-53	-104	-61	-15	27

Tablo 2'nin devamı												
Sıra	Ref	Co %at	Ni %at	Al %at	Ga %at	sb %at	YAPILAN İŞLEM	M _s (°C)	M _f (°C)	A _s (°C)	A _f (°C)	T _c (°C)
27	17	38	33	29			TAVLAMA (673-873)K SU İLE SOĞUTMA	-80	-142	-106	-46	54
28	17	39	32	29			TAVLAMA (673-873)K SU İLE SOĞUTMA	-141	≤- 160	≤-160	-95	75
29	17	38	34	28			TAVLAMA (673-873)K SU İLE SOĞUTMA	31	-34	-6	70	98
30	17	38	32	30			TAVLAMA (673-873)K SU İLE SOĞUTMA	-	-	-	-	40
31	16	33	29	38			SU DA BEKLETME 24H	70	47	68	84	-
32	15	37.2	34.5	28.3			1200C 24 H TAVLAMA SU DA SOĞUTMA	-	-	-	-	90
33	10	38	34	28			1173K TAVLAMA SU İLE SOĞUTMA	-	-	-	-	102
38	8	30	41	29			TAVLAMA (1350 C-2H) SU İLE SOĞUTMA	-	-	-	-	-2
39	8	32	39	29			TAVLAMA (1350 C-2H) SU İLE SOĞUTMA	164	145	177	196	23
40	8	34	37	29			TAVLAMA (1350 C-2H) SU İLE SOĞUTMA	115	82	109	142	51
41	8	35	36	29			TAVLAMA (1350 C-2H) SU İLE SOĞUTMA	68	41	73	104	-
42	8	36	35	29			TAVLAMA (1350 C-2H) SU İLE SOĞUTMA	36	2	26	63	-
43	8	36.5	34.5	29			TAVLAMA (1350 C-2H) SU İLE SOĞUTMA	34	0	23	47	-
44	8	38	33	29			TAVLAMA (1350 C-2H) SU İLE SOĞUTMA	-62	-77	-55	-38	47
45	8	39	32	29			TAVLAMA (1350 C-2H) SU İLE SOĞUTMA	-90	-118	-79	-53	72
46	8	41	30	29			TAVLAMA (1350 C-2H) SU İLE SOĞUTMA	-	-	-	-	112
47	8	20	50	30			TAVLAMA (1350 C-2H) SU İLE SOĞUTMA	-	-	-	-	-159
48	8	25	45	30			TAVLAMA (1350 C-2H) SU İLE SOĞUTMA	-	-	-	-	-116
49	8	30	40	30			TAVLAMA (1350 C-2H) SU İLE SOĞUTMA	141	130	140	156	-40
50	8	32.5	37.5	30			TAVLAMA (1350 C-2H) SU İLE SOĞUTMA	70	41	61	90	-15
51	8	35	35	30			TAVLAMA (1350 C-2H) SU İLE SOĞUTMA	-40	-61	-38	-19	-
52	8	36.5	33.5	30			TAVLAMA (1350 C-2H) SU İLE SOĞUTMA	-89	-	-91	-68	-7
53	8	37.5	32.5	30			TAVLAMA (1350 C-2H) SU İLE SOĞUTMA	-136	-	-128	-114	8
54	8	38.5	31.5	30			TAVLAMA (1350 C-2H) SU İLE SOĞUTMA	-	-	-	-	31
55	8	40	30	30			TAVLAMA (1350 C-2H) SU İLE SOĞUTMA	-	-	-	-	34
56	8	45	25	30			TAVLAMA (1350 C-2H) SU İLE SOĞUTMA	-	-	-	-	134
57	8	50	20	30			TAVLAMA (1350 C-2H) SU İLE SOĞUTMA	-	-	-	-	182
58	8	60	10	30			TAVLAMA (1350 C-2H) SU İLE SOĞUTMA	-	-	-	-	-
59	8	30	39	31			TAVLAMA (1350 C-2H) SU İLE SOĞUTMA	39	23	44	64	-84
60	8	32	37	31			TAVLAMA (1350 C-2H) SU İLE SOĞUTMA	-48	-66	-35	-15	-64
61	8	36.5	33.5	31			TAVLAMA (1350 C-2H) SU İLE SOĞUTMA	-	-	-	-	-46
62	8	38	31	31			TAVLAMA (1350 C-2H) SU İLE SOĞUTMA	-	-	-	-	-14
63	8	45	20	35			TAVLAMA (1350 C-2H) SU İLE SOĞUTMA	-	-	-	-	-56
64	8	38	34	28			TAVLAMA (1350 C-2H) SU İLE SOĞUTMA	71	42	75	96	117

65	8	38	34	28			TAVLAMA (1300C ^o) SU İLE SOĞUTMA	66	36	52	85	-
66	8	38	34	28			TAVLAMA (1250C ^o) SU İLE SOĞUTMA	-7	-42	-21	22	-
67	8	38	34	28			TAVLAMA (1200C ^o) SU İLE SOĞUTMA	-56	-95	-57	-17	17
68	8	38	34	28			TAVLAMA (1100C ^o) SU İLE SOĞUTMA	-140	-157	-129	-102	-36

5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada giriş bölümünde de belirtildiği gibi, şekil hatırlamalı Co bazlı alaşımların özellikleri incelendi. Şekil hatırlamalı Co bazlı alaşımlar üzerine yapılan araştırmaların incelemesi ile elde edilen sonuçlar aşağıda özetlendi.

Genellikle Co bazlı alaşımlarda martensitik dönüşüm sıcaklıklarına etki eden 3 ana faktör vardır. Matrisin kompozisyona bağlı elektron konsantrasyonu, atom büyüklük faktörü ve Çökelti fazları.

Co bazlı alaşımlarda Al konsantrasyonundaki değişim sonucunda A_S ve M_F sıcaklıkları değişse de A_S-M_F sıcaklık farkının 20 °C olduğu görülmektedir. Bu durumun böyle olmasını etkileyen iki faktör vardır. Birincisi atom konsantrasyonları, ikincisi birim hücre hacmidir. Şekil hatırlamalı Co-Ni-Al ve Co-Ni-Ga üçlü alaşımı yüksek sıcaklıklardan soğuma ile termoelastik martensit dönüşümüyle paramagnetik yapıdan ferromagnetik yapıya geçerler.

Co bazlı alaşımlarda Al ve Ga aynı valans elektronu sayısına sahip olmasına rağmen Ga'a göre Al eklenmesi atomun hacminde bir değişim oluşturur. Bu değişim birim hücredeki genişlemeden dolayıdır. Bu genişlemeden dönüşüm sıcaklıkları da etkilenir. Burada alaşıma Al eklenip, Ga çıkartılırsa alaşımın atomik yarıçapını büyütürken örgünün genişlemesine sebep olur. Bu genişlemeden dolayı M_S sıcaklığı düşer. Co bazlı alaşımlarda A_S - M_S arasındaki fark ne kadar az ise alaşım o kadar termoelastik yapı gösterir.

Martensit fazının e/a oranının küçük olması, örgü deformasyonunun da az olduğunu gösterir. Bu durum ise dönüşüm esnasında enerji değişikliğinin de küçük olmasına yol açar; bu küçük enerji değişikliği de martensitik dönüşüm sıcaklığını azaltacak şekilde malzemeyi etkiler, dislokasyonlar ve kalıcı martensit zor alanları M_S sıcaklığını malzeme üzerinde yapılacak her bir işlem döngüsü için arttıracaktır.

Şekil hatırlamalı Co bazlı alaşımlarda Ni ile Al konsantrasyonunun artması M_S sıcaklığını azaltır. Aynı zamanda Co bazlı alaşımlarda Ni ile Al konsantrasyonunun azalması ile T_C sıcaklığı artar.

Bu tür alaşımlarda Al miktarındaki değişim Ni miktarındaki değişime göre martensitik dönüşüm sıcaklıklarını daha fazla etkiler. Örneğin Al %1 artırıldığında yada azaldığında martensitik dönüşüm sıcaklığı 10 °C değişirken, Ni miktarındaki %1 değişim martensitik dönüşüm sıcaklığını ancak 2 °C değiştirir.

Şekil hatırlamalı Co-Ni-Al ve Co-Ni-Ga üçlü Alaşımın T_C (kritik) sıcaklığı Co miktarının arttırılmasıyla yükseltilebilir. T_C sıcaklığı martensit fazı dönüşüm sıcaklığından yüksek olduğu zaman, martensit faz dönüşümü manyetik alan ve ferromanyetiklikle meydana gelir.

Co bazlı alaşımlarda ortamın sıcaklığı yükseltildiğinde faz dönüşümü magnetik alandan etkilenir ve ferromagnetik şekil hatırlamalı alaşımlar üretilmiş olur. Malzemeye Al yanında Sb eklenmesi ile soğutma işlemi yapıldığında martensitik dönüşüm sıcaklıklarında azalma meydana gelir. Martensitik dönüşüm sıcaklık aralığı $\Delta T_m = [(M_s - M_f) + (A_s - A_f)] / 2$ formülü ile verilir.

Yapılan litaretür taramasında şekil hatırlamalı Co bazlı alaşımlarda e/a oranının artırılması ile A_S ve M_S sıcaklıkları da düzenli bir şekilde artar.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Soğulsu, A.K., (2006). Şekil Hatırlamalı Cu-Al-Ni Ve Cu-Zn-Al Alaşımların Üretilmesi Ve Özelliklerinin İncelenmesi. (Yüksek Lisans Tezi), Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
2. Kayalı, N., (1993). CuZnAl alaşımlarında martensit stabilizasyonu ve yaşlandırma etkileri", (Doktora Tezi). Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Fizik Anabilim Dalı.
3. Aydoğdu, A., (1995). Şekil Hatırlamalı Cu-Al-Ni Alaşımlarındaki Martensitik Dönüşümler Üzerinde Termal Yaşlandırma Etkileri. . (Doktora Tezi). Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Fizik Anabilim Dalı.
4. Liu, J. and Li, J.G., (2006). Magnetic Force Microscopy Observations Of Co-Ni-Ga and Co-Ni-Al Alloys With Two-Phase Structures. Scripta Materialia 55, (755-758).
5. Jayaram Dadda, H.J., Maier, I., Karaman, H.E., and Karaca, Y.I., Chumlyakov., (2006). Pseudoelasticity At Elevated Temperatures in [001] Oriented Co₄₉ Ni₂₁ Ga₃₀ Single Crystals Under Compression. Scripta Materialia, 55, (663-666)
6. Gökdemir, N., (2006). Şekil Hatırlamalı Cu-%14,70al-%4,72ni Alaşımında Martensitik Dönüşümün Kristalografik ve Kinetik Özellikleri. (Yüksek Lisans Tezi) Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fen Bilimleri Enstitüsü. Fizik Anabilim Dalı
7. Eskil, M., (2006) . Fe-Mn-Si Alaşımlarının Mekanik Ve Termal Etkiler Altında Şekil Hatırlama Özelliklerini İncelenmesi. (Doktora Tezi). Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Fizik Anabilim Dalı.
8. Tanaka, Y., Oikawa, K., Sutou, Y., Omori, T., Kainuma, R., and Ishida, K..(2006). Martensitic Transition and Superelasticity of Co-Ni-Al Ferromagnetic Shape Memory Alloys With $\beta + \gamma$ Two-Phase Structure. Materials Science and Engineering, (1054-1060).
9. Jian L., Hongxing Z., Yanlu H., Mingxu X., and Jianguo L., (2005). Microstructure and Magnetic Field Induced Strain of Directionally Solidified Ferromagnetic Shape Memory CoNiAl Alloys. Scripta Materialia, 53, (29-33).
10. Liu, Z.H., Dai, X.F., Zhu, Z.H., and Chen J.L., (2004). Martensitic transformation And magnetic properties of Co-Ni-Al shape memory Alloys ribbons. Scripta Materialia 37, (2643-2647).
11. Zhuhong, L., Shuyun ,Y., Hong, Y., Guangheng, W., and Yinong, L., (2008). Phase Separation and Magnetic Properties of Coenial Ferromagnetic Shape Memory Alloys. Intermetallics, 16, (447-452).
12. Xu Guo-Fb, Y., Zhi-Min, L., Feng-Hua, M., Shen-Zhou, K., (2006). Martensitic and Magnetic Transformation of Transactions of Nonferrous Metals Society of China. (776-782)
13. Morito, H., Fujita, A., Fukamichi, K., Kainuma, R., and Ishida, K., (2002) Magnetocrystalline Anisotropy in Single-Crystal Co-Ni-Al Ferromagnetic Shape-Memory Alloy. Department of Materials Science, 980, (1657-1659).
14. Chumlyakov, Y.I., Kireeva, I.V., Panchenko, E.Y., Timofeeva, E.E., Pobedennaya, Z.V. Chusov, S.V., Karaman, I., Maier, H., Cesari, E., and Kirillov, V.A., (2008). High-Temperature Superelasticity in CoNiGa, CoNiAl, NiFeGa, and TiNi Monocrystals. Russian Physics Journal. 669, (1016-1036)
15. Efsthathiou, C., Sehitoglu, H., Wagoner Johnson, A.J., Hamilton R.F., Maier, H.J., and Chumlyakov, Y., (2004). Large Reduction in Critical Stress in Co-Ni-Al Upon Repeated Transformation. Scripta Materialia , 51 , (979-985).
16. Karaca, H.E., Karaman, I., Chumlyakov, Y.I., Lagoudas, D.C., and Zhang, X., (2004). Compressive Response of a Single Crystalline Conial Shape Memory Alloy. Scripta Materialia, 51, (261-266).

17. Valiullin, A.I., Kositsin, S.V., Kositsina, I.I., Kataeva, N.V., and Zavalishin, V.A., (2006). Study of Ferromagnetic Co-Ni-Al Alloys With Thermoelastic L10 Martensite. *Materials Science and Engineering*, a 438-440. (1041-1044).
18. Chatterjee, S., Thakur, M., Giri, S., Majumdar, S., Deb, A.K., De S.K., (2008). Transport, Magnetic and Structural Investigations of Co-Ni-Al Shape Memory Alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, 456, (96-100).
19. Wojciech, M., (2008). Structure Changes Of Co-Ni-Al Ferromagnetic Shape Memory Alloys After Vacuum Annealing and Hot Rolling. *Journal of Alloys and Compounds*, 448, (223-226).
20. Murakami, Y., Shindo, D., Oikawa, K., Kainuma, R., Ishida, K., (2002). Magnetic Domain Structures in Co-Ni-Al Shape Memory Alloys Studied by Lorentz Microscopy and Electron Holography. *Acta Materialia*, 50, (2173-2184).
21. Chumlyakov, Y.I., Kireeva, I.V., Karaman, I., Panchenko, E.Y., Zakharova, E.G., Tverskov, A.V., Ovsyannikov, A.V., Nazarov, K.M., and Kirillov, V.A., (2004). Orientational Dependence of Shape Memory Effects and Superelasticity in CoNiGa, NiMnGa, CoNiAl, FeNiCoTi, and TiNi Single Crystals. *Russian Physics Journal*, 669, (893-911).
22. Liu, J., Zheng, H.X., Xia, M.X., Huang, Y.L., Li, J.G., (2005). Martensitic Transformation and Magnetic Properties in Heusler Coniga Magnetic Shape Memory Alloys. *Scripta Materialia*, 52, (935-938).
23. Oikawa, K., Ota, T., Imano, Y., Omori, T., Kainuma, R., and Ishida, K., (2005). Phase Equilibria and Phase Transformation Of Co-Ni-Ga Ferromagnetic Shape Memory Alloy System. *Basic and Applied Research*, 27, (75-82).
24. Toptaş, E., (2006). Şekil Hafızalı Metaller İle Aktüatör Tasarımı. (Yüksek Lisans Tezi) Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Makine Eğitimi Anabilim Dalı Makine Eğitimi Programı.