

T.C.
MUĞLA SITKI KOÇMAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FİZİK ANABİLİM DALI

ŞEKİL HATIRLAMA ETKİSİ GÖSTEREN
NİKEL-TİTANYUM-BAKIR (Ni-Ti-Cu) İNCE
FİLMLEİN ÜRETİLMESİ, YAPISAL VE TERMAL
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

KADİR CAN MERAL

MART 2017

MUĞLA

MUĞLA SITKI KOÇMAN ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü

TEZ ONAYI

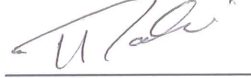
KADİR CAN MERAL tarafından hazırlanan **ŞEKİL HATIRLAMA ETKİSİ GÖSTEREN NİKEL-TİTANYUM-BAKIR (Ni-Ti-Cu) İNCE FİLMLEİN ÜRETİLMESİ, YAPISAL VE TERMAL ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ** başlıklı tezinin, 13/03/2017 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Fizik Anabilim Dalı'nda yüksek lisans derecesi için gerekli şartları sağladığı oybirliği/oyçokluğu ile kabul edilmiştir.

TEZ SINAV JURİSİ

Prof.Dr. Şükrü TALAŞ (**Jüri Başkanı**)

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Ana Bilim Dalı,
Afyon Kocatepe Üniversitesi, Afyon

İmza:



Prof.Dr. Selçuk AKTÜRK (**Danışman**)

Fizik Anabilim Dalı,
Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi, Muğla

İmza:



Yrd. Doç. Dr. Yusuf SAMANCIOĞU (**Üye**)

Sağlık Hizmetleri Meslek Yüksekokulu,
Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi, Muğla

İmza:

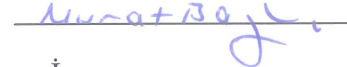


ANA BİLİM DALI BAŞKANLIĞI ONAYI

Prof. Dr. Murat BAYHAN

Fizik Ana Bilim Dalı Başkanı,
Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi, Muğla

İmza:



Prof. Dr. Selçuk AKTÜRK

Danışman, Fizik Anabilim Dalı,
Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi, Muğla

İmza:



Savunma Tarihi: 13/03/2017

Tez çalışmalarım sırasında elde ettiğim ve sunduğum tüm sonuç, doküman, bilgi ve belgelerin tarafımdan bizzat ve bu tez çalışması kapsamında elde edildiğini; akademik ve bilimsel etik kurallarına uygun olduğunu beyan ederim. Ayrıca, akademik ve bilimsel etik kuralları gereği bu tez çalışması sırasında elde edilmemiş başkalarına ait tüm orijinal bilgi ve sonuçlara atıf yaptığımı da beyan ederim.

KADİR CAN MERAL

13/03/2017

ÖZET
ŞEKİL HATIRLAMA ETKİSİ GÖSTEREN
NİKEL-TİTANYUM-BAKIR (Ni-Ti-Cu) İNCE FİLMLEİN
ÜRETİLMESİ, YAPISAL VE TERMAL ÖZELLİKLERİNİN
İNCELENMESİ

Kadir Can MERAL

Yüksek Lisans Tezi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Fizik Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Selçuk AKTÜRK

Mart 2017, 46 sayfa

Şekil hatırlama özelliği gösteren malzemeler, biyomedikal implantlar, robotlar, havacılık gibi birçok mühendislik ve tıp alanında geniş bir teknolojik uygulama alanı bulabilen malzemelerdir. Sıcaklık ve deformasyona bağlı olarak meydana gelen faz dönüşümleri bu şekil hatırlama özelliğini ortaya çıkarmaktadır.

Bu tez kapsamında, Nikel-Titanyum-Bakır (Ni-Ti-Cu) şekil hatırlama özelliği gösteren ince filmler üretilerek, yapısal ve termal özellikleri araştırılmıştır. İnce filmlerin üretilmesi için RF magnetron-sputtering yöntemi kullanılmıştır. Yapısal özellikleri araştırmak için X Işınları Kırınım (XRD) yöntemi ve termal özellikler için ise Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (DSC) sistemi kullanılmıştır. RF magnetron sputtering yöntemi ile üretilen ince filmlerin ısı işlem görmeden önceki halinin amorf yapıda ve ısı işlem gördükten sonra martensitik kristal yapıda olduğu belirlenmiş ve martensitik dönüşüm sıcaklığının ise yaklaşık 50-60 °C olduğu tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Ni-Ti, Ni-Ti-Cu, Şekil Hatırlama Özelliği.

ABSTRACT
PRODUCTION, INVESTIGATION OF STRUCTURAL AND
THERMAL PROPERTIES OF SHAPE MEMORY EFFECT SHOWING
NICKEL-TITANIUM-COPPER (Ni-Ti-Cu) THIN FILMS

Kadir Can MERAL

Master of Science (M.Sc.)

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Physics

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Selçuk AKTÜRK

March 2017, 46 pages

Shape memory materials can find a wide range of technological applications in many engineering and medical fields such as biomedical implants, robots, aviation. The phase transformations that take place due to temperature and deformation reveal this shape memory feature.

In this thesis, structural and thermal properties of nickel-titanium-copper (Ni-Ti-Cu) thin films were investigated. RF magnetron-sputtering method is used to produce thin films. X-ray diffraction (XRD) method was used to investigate structural properties and Differential Scanning Calorimetry (DSC) system was used for thermal properties. The thin films produced by the RF magnetron sputtering method were found to be amorphous before the heat treatment and it was determined that it was in a martensitic crystal structure after heat treatment and martensitic transformation temperature is about 50-60 °C.

Keywords: Ni-Ti, Ni-Ti-Cu, Shape Memory Effect.

ÖNSÖZ

Bu tez çalışmam, Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümü öğretim üyelerinden Sayın Prof. Dr. Selçuk AKTÜRK danışmanlığında yapılmıştır. Tez çalışmam boyunca her türlü tecrübe ve bilgi birikimini esirgemeyen, çalıştığım örneklerin deney düzeneklerinin kurulmasını sağlayan, deneylerim ve ölçümlerim sırasında bana yardımcı olan, çalışmamın sonuca erdirilmesinde her türlü yardımını, desteğini gördüğüm danışman hocam Prof. Dr. Selçuk AKTÜRK'e saygılarımı ve şükranlarımı sunar, teşekkür etmeyi bir borç bilirim.

Tez çalışmamın her aşamasında fikir, öneri ve destekleriyle daima yanımda olan Yrd. Doç. Dr. Ergün TAŞARKUYU, Yrd. Doç. Dr. Yusuf SAMANCIOĞLU ve Arş. Gör. Çiğdem Elif DEMİRCİ hocalarıma saygı ve teşekkürlerimi sunar, teşekkür etmeyi bir borç bilirim.

Bu çalışmamın oluşmasında yardımını esirgemeyen Afyon Kocatepe Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü öğretim üyesi Prof. Dr. Şükrü TALAŞ hocama teşekkürlerimi sunarım.

Laboratuar çalışmasındaki emeklerinden ve yardımlarından dolayı Uz. Mehmet POYRAZ, Uz. Taha COŞKUN, Uz. Özge Tokul ÖLMEZ ve Uz. Dr. Tuba BAYGAR'a teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarım boyunca yardımlarından dolayı değerli arkadaşlarım Necdet AKA, Uğur Mert ÇETİNKAYA, Ali PELİT, Şükrü KAFAL, Özkan ÜZÜM, Emine SARIKAYA, Sinem DİLBİLMEZ, Aysun Eda AKTÜRK'e teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışmayı hazırlamamda maddi, manevi desteğini esirgemeyen, her zaman bana güvenen ve yanımda olan aileme, akrabalarıma sevgi, saygı ve sonsuz teşekkürlerimi sunar, teşekkür etmeyi bir borç bilirim.

Bu tez çalışması, BAP-14-076 numaralı Bilimsel Araştırma Projesiyle desteklenmiştir.

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xii
1. GİRİŞ	1
2. GENEL BİLGİLER	2
2.1. Şekil Hafızalı Alaşımlar ve Şekil Hafıza Özellikleri.....	2
2.1.1. Şekil hafıza özelliği ve martensitik faz dönüşümü.....	2
2.1.2. Şekil hafızalı alaşımların süperelastik özelliği.....	4
2.1.3. Şekil hafıza gösteren alaşımlar.....	5
2.2. Nikel-Titanyum Şekil Hafızalı Alaşımlar.....	7
2.2.1. Nikel-titanyum faz diyagramı.....	8
2.2.2. Nikel-titanyum şekil hafızalı alaşımın kristal yapısı.....	9
2.2.3. Alaşımdaki nikel oranının martensitik dönüşüm sıcaklığına etkisi.....	10
2.2.4. Martensitik dönüşüm sıcaklığını belirleme yöntemleri.....	11
2.2.5. NiTi alaşımlardaki faz dönüşümlerine katkı elementlerinin etkisi.....	12
2.2.6. NiTi şekil hafızalı alaşımların üretim yöntemleri.....	13
2.2.7. NiTi şekil hafızalı alaşımların uygulamaları.....	13
2.3. Nikel-Titanyum Şekil Hafızalı İnce Filmler.....	18
2.3.1. NiTi şekil hafızalı alaşımların üretim yöntemleri.....	19
2.3.2. NiTi şekil hafızalı ince filmlerin uygulamaları.....	22
3. MALZEME VE YÖNTEM	25
3.1. Örneklerin Hazırlanması.....	25
3.2. Yapısal Analiz Teknikleri.....	28
3.2.1. X-ışınları kırınım analizi (XRD).....	28
3.2.2. Enerji dağılımlı x-ışınları spektroskopisi (EDS).....	29
3.3. Termal Analiz Teknikleri.....	31

3.3.1. Diferansiyel taramalı kalorimetri (DSC).....	32
3.4.RF Magnetron Sputter.....	33
4. ARAŞTIRMA BULGULARI	35
4.1. Yapısal Analiz Ölçümleri.....	35
4.1.1. Enerji dağınımlı x-ışınları spektroskopisi (EDS) analizi.....	35
4.1.2. X-ışınları kırınım (XRD) analizi.....	37
4.1.3. Diferansiyel taramalı kalorimetri (DSC) analizi.....	41
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	42.
KAYNAKLAR.....	43
ÖZGEÇMİŞ.....	46

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. Bazı şekil hafızalı alaşımların bileşimi, martenzitik dönüşüm sıcaklıkları ve sıcaklık histerezisleri.....	6
Çizelge 4.1. Ti-Ni ve Ti-Ni-Cu alaşımlarının atomik kompozisyonu.....	36

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Soğutulma ve ısıtılma esnasında sabit bir yük altındaki numuneye ait karakteristik dönüşüm-sıcaklık eğrisi, T_h : Dönüşüm histerezisi.....	3
Şekil 2.2. Şekil hafıza etkisi.....	4
Şekil 2.3. Şekil hafızalı alaşımlarda süperelastik özellik.....	5
Şekil 2.4. TiNi faz diyagramı	8
Şekil 2.5. Nitinol alaşımlarda faz dönüşümü.....	9
Şekil 2.6. M_s sıcaklığının alaşımdaki Ni oranına bağlı olarak değişimi.....	10
Şekil 2.7. DSC analizi ile ısıtma ve soğutma sonucu belirlenen faz dönüşümleri.....	11
Şekil 2.8. TiNiCu alaşımlarında bakır içeriğinin martensitik dönüşüm sıcaklığına etkisi.....	12
Şekil 2.9. Şekil hafızalı birleştirme elemanı.....	14
Şekil 2.10. ŞHA tahrikli dönen kol.....	15
Şekil 2.11. Doğrudan tahrikli robotik ŞHA aktüatör.....	15
Şekil 2.12. Nitinol tüpten lazerle kesilerek üretilen bir stent modeli.....	16
Şekil 2.13. Tıkanık damarın NiTi stentle açılması.....	17
Şekil 2.14. Sıçratma sisteminin şematığı.....	19
Şekil 2.15. Manyetik sıçratma mekanizması.....	21
Şekil 2.16. NiTi ŞHA mikro tutucu.....	22
Şekil 2.17. NiTi ŞHA film içeren mikro valf.....	23
Şekil 2.18. TiNi mikro ayna yapısı; NiTi/Si demetinden oluşan aktüatör kollar	
a. Üstten görünüş	
b. Alttan görünüş.....	24
Şekil 3.1. a. Su jeti sistemi	
b. Ni levhanın kesilmesi	
c. Ni ve Cu hedeflerin yerleştirilmesi.....	26
Şekil 3.2. Üretilen örneklerin görüntüsü.....	27
Şekil 3.3. Işıl işlem fırını.....	27

Şekil 3.4. Elmas uçlu metal kesici.....	27
Şekil 3.5. Rigaku marka smartlab x-ışını kırınım cihazı.....	29
Şekil 3.6. X-ışını dedektörü.....	29
Şekil 3.7. Örnek ile örnek yüzeyine gönderilen elektronların etkileşmesi.....	30
Şekil 3.8. TA Instruments DSC 2010.....	31
Şekil 3.9. DSC analizi ile gözlenebilecek üç olaya ait eğriler.....	32
Şekil 3.10. Sputter cihazı.....	34
Şekil 4.1. Ti-Ni alaşımına ait EDS spektrumu.....	36
Şekil 4.2. Ti-Ni-Cu alaşımına ait EDS spektrumu.....	36
Şekil 4.3 .a. Ti-Ni alaşımlarının ısı işlem görmeden önceki XRD desenleri b. Ti-Ni-Cu alaşımlarının ısı işlem görmeden önceki XRD desenler.....	38
Şekil 4.4. 500 °C'de a. 1 saat ısı işlem gören Ti-Ni alaşımının XRD desenleri b. 2 saat ısı işlem gören Ti-Ni alaşımının XRD desenleri c. 3 saat ısı işlem gören Ti-Ni alaşımının XRD desenleri.....	39
Şekil 4.5. 500 °C'de a. 1 saat ısı işlem gören Ti-Ni-Cu alaşımının XRD desenleri b. 2 saat ısı işlem gören Ti-Ni-Cu alaşımının XRD desenleri c. 3 saat ısı işlem gören Ti-Ni-Cu alaşımının XRD desenleri.....	40
Şekil 4.6. 500 °C'de 3 saat ısı işlem gören Ni-Ti-Cu alaşımının DSC eğrisi.....	41

SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ

bcc	Hacim Merkezli Kübik Yapı
bct	Hacim Merkezli Tetragonal Yapı
fcc	Yüz Merkezli Kübik Yapı
hcp	Sıkı Paketlenmiş Hegzagonal Yapı
Å	Angstrom
A _s	Martensite – Austenite Ters Dönüşüm Başlama Sıcaklığı
A _f	Martensite – Austenite Ters Dönüşüm Bitiş Sıcaklığı
A _f -M _d	Gerilmenin Neden Olduğu Martensite
L	Deformasyon Sonucu Cismin Boyu
L ₀	Cismin İlk Boyu
M _s	Austenite – Martensite Faz Dönüşüm Başlama Sıcaklığı
M _f	Austenite – Martensite Faz Dönüşüm Bitiş Sıcaklığı
mm	Milimetre
nm	Nanometre
T	Austenite – Martensite Fazın Dengeye Bulunduğu Sıcaklık
T _h	Dönüşüm Histerezisi
Ni-Ti	Nikel – Titanyum
Ni-Ti-Cu	Nikel – Titanyum - Bakır
DSC	Diferansiyel Taramalı Kalorimetri
DTA	Diferansiyel Termal Analiz
EDS	Enerji Dağılım Spektroskopisi
MEMS	Mikroelektro Mekanik Sistemler
MUALM	Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi Araştırma Laboratuvarları Merkezi
RF	Radyo Frekansı
SANAEM	Ankara/Sarayköy Nükleer Araştırma Merkezi
SEM	Taramalı Elektron Mikroskop
SE	Süperelastiklik
SME	Shape Memory Effect (Şekil Hatırlama Etkisi)
TAEK	Türkiye Atom Enerji Kurumu

TEM	Geçirmeli Elektron Mikroskop
TG	Termogravimetri
XRD	X – Işını Kırınımı

1. GİRİŞ

RF Magnetron-sputtering (Koparıp Biriktirme Metodu) yöntemi ile üretilen şekil hatırlama özellikli ince filmlerin yapısal ve termal özelliklerinin incelenmesi bu çalışmanın temelini oluşturmaktadır. Ni-Ti alaşımına Cu elementinin ilave edilmesiyle faz dönüşüm sıcaklığının nasıl değiştiği tespit edilip, ortaya çıkan fazların hangi kristal yapıya ve morfolojiye sahip olduğu belirlenmiştir. Bu tez çalışmasından elde edilen sonuçlarla literatürde bulunan sonuçlar kıyaslanarak güncel teknolojik uygulamalarda daha verimli bir malzemenin hangi şartlarda elde edilmesi gerektiği tartışılmıştır.

İnce filmlerin üretilmesi ve yapısal karakterizasyonu Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi Araştırma Laboratuvarları Merkezi (ALM) bünyesinde bulunan laboratuvarlarda ve faz geçiş sıcaklıklarının belirlenmesi ise Türkiye Atom Enerjisi Kurumu Sarayköy Nükleer Araştırma Merkezi laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir.

2. GENEL BİLGİLER

2.1. Şekil Hafızalı Alaşımlar ve Şekil Hafıza Özellikleri

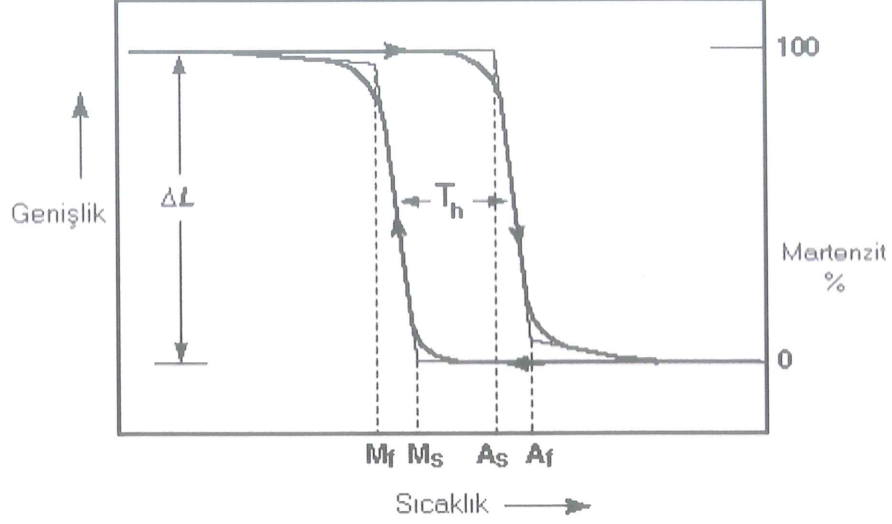
Şekil hafızalı alaşımlar, deformasyona uğratılıp, uygun ısıl işlemler uygulandığında eski haline dönebilen malzemelerdir. Şekil hafıza özelliği ve süperelastik özellik, bu alaşımların en önemli özelliklerindedir. Bu malzemeler kristal yapılarında oluşan martensite ve austenite faz dönüşümleri sonucunda şekillerini değiştirebilirler. Yüksek sıcaklıkta austenite fazında olan alaşım, düşük sıcaklıkta martensite yapıya sahip olduktan sonra üzerine uygulanan kuvvetle şekil değiştirir ve daha sonra tekrar ısıtıldığında austenite fazına geçerek eski şekline geri döner. Şekil hafızalı alaşımların bu özelliklerine şekil hafıza özelliği denir. Şekil hafıza özelliği tek yönlü ve çift yönlü şekil hafıza davranışı olmak üzere iki çeşittir. Isıtılması sonucunda eski haline dönebilenler tek yönlü şekil hafıza davranışı, hem düşük hem yüksek sıcaklıklardaki şekillerine geri dönüş yapabilenler çift yönlü şekil hafıza davranışı olarak adlandırılır.

2.1.1. Şekil hafıza özelliği ve martensitik faz dönüşümü

Şekil hafızalı alaşımlarda, yüksek sıcaklıklarda austenite fazın uzun süren dönüşümü sonucunda termoelastik martensite meydana gelmesi işlemi martensitik dönüşüm olarak isimlendirilir. Atomların yer değiştirme miktarı çok büyük olmamasına rağmen, hepsinin birden hacimsel yönde aynı doğrultuda taşınmasından dolayı, dönüşüm sonucunda makroskopik bir şekil değişimi gerçekleşir. Sonuç olarak normal metal ve alaşımlardan farklı niteliklere sahip olan şekil hafıza etkisi ve süperelastisite gibi eşsiz ve üstün özellikler açığa çıkar. Martensitik faz dönüşümü, difüzyonsuz bir katı hal faz dönüşümüdür. Bu dönüşüm termoelastik ve termoelastik olmayan martensitik dönüşüm olmak üzere iki gruba ayrılabilir (Otsuka vd., 2002).

Şekil hafızalı alaşımlarda martensitik dönüşümün termoelastik olması; alaşımda sıcaklığın düşmesi ile martensite plakaların oluşması ve büyümesi, sıcaklığın artmasıyla da büyüme yönünün tam tersi yönde kaybolması olarak açıklanabilir. Yüksek sıcaklık fazının (austenite faz) kafes yapısı çoğunlukla kübiktir, martensite yapının kafes yapısı ise düşük simetri özelliği gösterir (Dilibal, 2005).

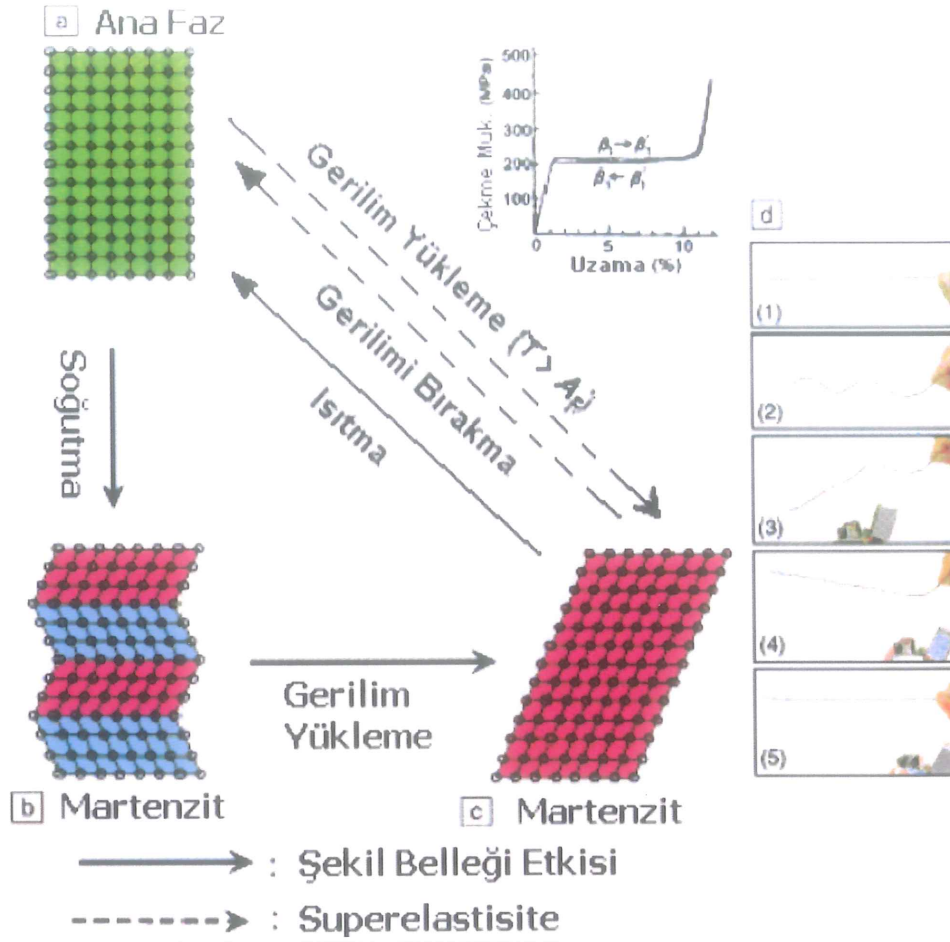
Şekil hafızalı alaşımlarda martensite ve austenite fazları arasındaki dönüşümler bir sıcaklık aralığında tamamlanır. Şekil 2.1’ de austenite fazının başladığı sıcaklık A_s , bittiği sıcaklıkta A_f olarak gösterilmektedir. Martensite fazının başladığı sıcaklık M_s , bittiği sıcaklıkta M_f olarak adlandırılır. Faz dönüşümlerinin başlangıç ve bitiş sıcaklıklarının farklı olmasından dolayı dönüşüm sırasında histerezis bölgesi oluşur.



Şekil 2.1. Soğutulma ve ısıtılma esnasında sabit bir yük altındaki numuneye ait karakteristik dönüşüm-sıcaklık eğrisi. T_h : Dönüşüm histerezisi (Akdoğan vd., 2003)

Kristal yapı malzemelerde atomların düzgün ve sıralı halde dizilmeleriyle kafes yapıları ve birim hücreler ortaya çıkmaktadır. Malzemelerin veya mekanik gerilmeler altında kalmasıyla atom dizilmelerinde değişiklikler oluşur. Atom dizilişlerinin dislokasyonların hareket etmesiyle değil de, atom sıralarının belirli bir düzleme göre olan uzaklıklarına orantılı olarak ilerlemeleri sonucunda oluşan değişiklikler “ikizlenme” olarak bilinir. Şekil hafızalı alaşımlarda austenite fazının martensite faza dönüşümü sırasında da ikizlenmeler ortaya çıkar. Ayrıca, martensite fazına mekanik yüklerin uygulanması sonucunda malzeme yapısı içerisindeki ikizlenmeler belli bir şekilde yönlendirilebilirler (Callister, 2003).

Martensite, oldukça düşük bir gerilme değerinde dahi bir miktar deformasyon gösterecek kolaylıkla şekillendirilebilmektedir. Oysa yüksek sıcaklık fazı olan austenite daha akma dayanımına sahip olduğundan, kolayca deforme edilemez. Austenite fazda iken harici bir ısıtma veya deformasyon ile geri kazanılabilir bir şekil değişimi sağlanamaz. Çünkü yapıda faz değişimi meydana gelmemektedir (Toptaş vd., 2007).

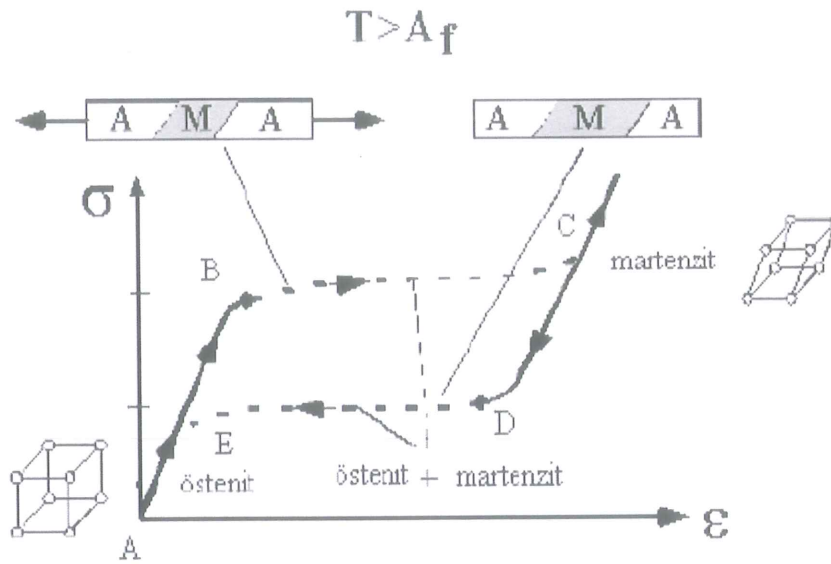


2.1.2. Şekil hafızalı alaşımların süperelastik özelliği

Şekil hafızalı alaşımlarda görülen süperelastik özellik, şekil hafıza özelliğinde olduğu gibi martenzitik faz dönüşümü sonucu oluşan bir özelliktir.

Şekil hafızalı alaşımlarda martenzitik dönüşümün A_f sıcaklığı üzerinde ve mekanik yükler altında oluşması sonucunda gerilmenin neden olduğu martensite fazı ortaya çıkar. Bu nedenle austenite yapıdaki alaşım gerilmeye maruz bırakıldığında, martenzitik dönüşüm sırasında deformasyon oluşur. Eğer gerilme kaldırılırsa austenite fazı oluşur ve malzeme eski şekline geri döner. Bu durumda malzemede kalıcı şekil değişimi olmaksızın % 8' e varan şekil değişimleri süperelastik olarak geri kazanılmış olur.

Şekil hafızalı alaşımların süperelastik özelliğinin kullanılabilmesi için alaşımın sıcaklığının austenite sıcaklığı üzerinde olması ön koşuldur. Bunu sağlamak için çoğunlukla endüstriyel uygulamalarda alaşımın oda sıcaklığında A_f üzerinde bulunduğu durumlar tercih edilir. Örneğin alaşımın süperelastik özelliği kullanılarak geliştirilen nikel-titanyum diş tellerinin A_f sıcaklığı -5 ile 10°C arasında bulunmaktadır. Böylece ağız içi kullanımlarda alaşım her zaman austenite sıcaklığı üzerinde bulunur. Şekil 2.3'de şekil hafızalı alaşımların süperelastik özellik gösterdiği A_f-M_d (gerilmenin neden olduğu martensite) bölgesi gösterilmiştir (Dilibal, 2005).



Şekil 2.3. Şekil hafızalı alaşımlarda süperelastik özellik

2.1.3. Şekil hafıza özelliği gösteren alaşımlar

Şekil hafızalı alaşımlarla ilgili ilk inceleme 1932 yılında Chang ve Read tarafından AuCd alaşımında, şekil değişimi metalografik inceleme ve öz direnç değişimiyle açıklanmıştır. % 46.50 Cd (atomca) oranına sahip AuCd alaşımının martensitik dönüşüm sıcaklığı 30°C ile 100°C arasında görülmektedir.

1938'de şekil hafıza özelliği bakır-çinko alaşımında (ağırlıkça % 38.5 / 41.5 Zn) görülmüştür. Bunu izleyen yıllarda diğer bakır ve demir alaşımlarında (CuAuZn, CuAlNi, CuSn, CuMn, FeMnSi, FePt, FePd) ve 1962 yılında da eşatomik oranda nikel-titanyum alaşımında şekil hafıza özelliği tespit edilmiştir.

Çizelge 2.1'de bazı şekil bellekli alaşımların bileşimi, martensitik dönüşüm sıcaklıkları ve sıcaklık histerezisleri gösterilmektedir (Selimbeyoğlu, 1992).

Çizelge 2.1. Bazı şekil hafızalı alaşımların bileşimi, martensitik dönüşüm sıcaklıkları ve sıcaklık histerezisleri (Funakubo, 1987)

Alaşım	Bileşim Oranı	Martensitik Dönüşüm Sıcaklığı M_s (°C)	Histerezis
Bakır Esaslı			
CuZn	%38.5 / 41.5 Zn (ağ.)	-180 ile -10 arası	~ 10
CuAuZn	% 23-28 Au, % 45-47 Zn (ağ.)	-140 ile 100 arası	~ 35
CuAlNi	% 14 Al, % 3.5 Ni (ağ.)	-150 ile 200 arası	~ 35
CuSn	% 15 Sn (at.)	-120 ile 30 arası	~ 10
CuMn	% 5/35 Cu (at.)	-250 ile 180 arası	~ 25
Nikel Esaslı			
NiTi	%49-51 Ni (at.)	-50 ile 100 arası	~ 30

Çizelge 2.1. (devam)

Alaşım	Bileşim Oranı	Martensitik Dönüşüm Sıcaklığı M_s (°C)	Histerezis
NiAl	% 36-38 Al (at.)	-180 ile 100 arası	~ 10
Demir Esaslı			
FeMnSi	% 32 Mn, % 6 Si	-200 ile 150 arası	~ 100
FePt	% 25 Pt (at.)	-130	~ 4

Bakır ve nikel esaslı alaşımlar endüstriyel uygulamalara en yakın özellik gösteren alaşımlardır. Nikel esaslı alaşımların bakır esaslı alaşımlara göre daha yüksek oranda şekil hafıza ve süperelastik özellik göstermesinden dolayı nikel-titanyum şekil hafızalı alaşımlar dünyada en fazla ticari ilgi uyandıran şekil hafızalı alaşımlar olmuştur (Liu vd., 2002).

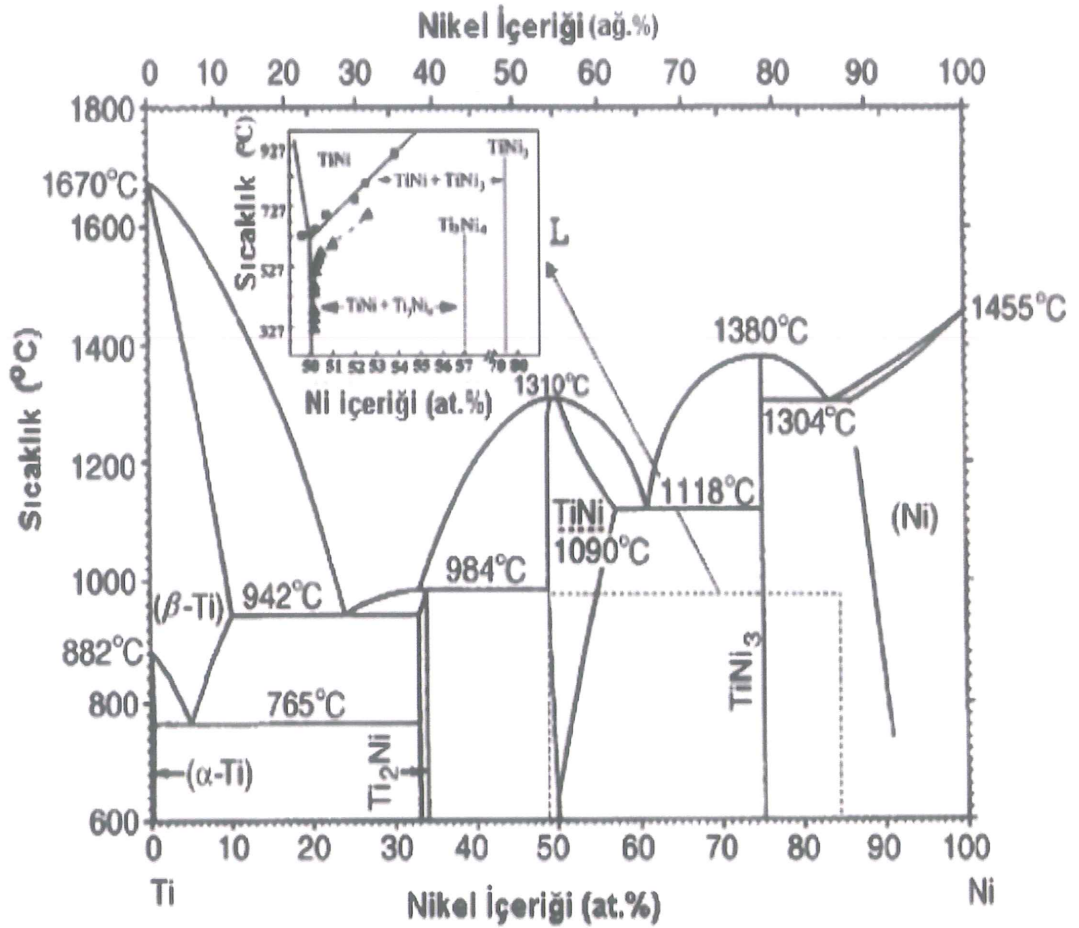
2.2. Nikel-Titanyum şekil Hafızalı Alaşımlar

Nikel-Titanyum (Ni-Ti) alaşımında şekil hafıza etkisinin keşfi 1962' de W.J.Buehler ve arkadaşları tarafından A.B.D. Deniz Savaş Araçları Laboratuvarında olmuştur. Ticari ismiyle Nitinol (Ni-Ti Naval Ordnance Laboratory) olarak adlandırılır (Dilibal, 2005).

2.2.1. Nikel-titanyum faz diyagramı

NiTi ikili faz diyagramı şekil 2.4' deki gibidir. Bu diyagramda, eşit oranda titanyum ve nikel atomlarından oluşan atomca % 50 nikel bölgesinde intermetalik NiTi oluşumu gözlenir. Saf nikel ergime derecesi 1455 °C, saf titanyum ergime derecesi ise 1670 °C'dir. Eşit oranda NiTi alaşımının ergime derecesi 1310 °C'dir.

İntermetalik NiTi yapı 630 °C'den itibaren NiTi ara fazı oluşturur. Atomca %50 ile %55 nikel oranına sahip bölgeye uygulanan yaşlandırma işlemi, yapı içerisinde dağılmış $TiNi_3$ ve Ti_3Ni_4 çökeltileri oluşur. Ti_3Ni_4 çökeltileri alaşımın çift yönlü şekil hafıza özelliği olduğunu gösterir.

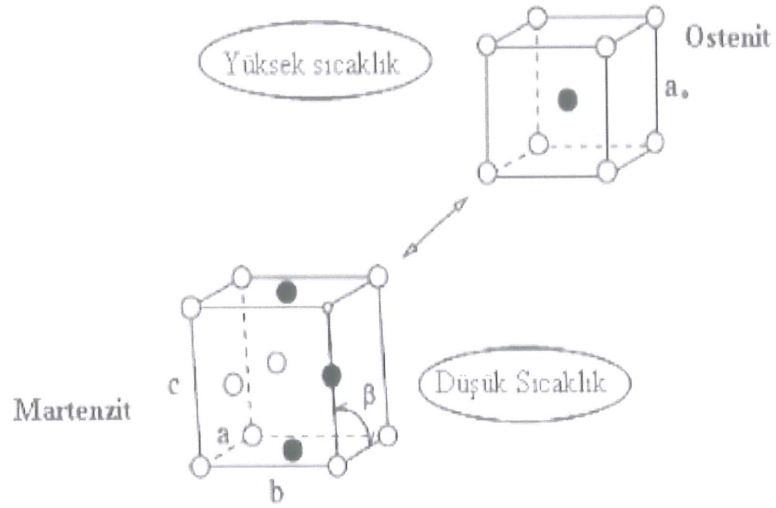


Şekil 2.4. TiNi faz diyagramı (Massalski vd., 1990)

2.2.2. Nikel-titanyum şekil hafızalı alaşımların kristal yapısı

Nikel-titanyum şekil hafızalı alaşımların martensitik faz dönüşümü sonucunda kristal yapısı austenite fazda iken kübik kafes yapısında, martensite fazda iken monoklinik kafes yapısındadır. Austenite fazda iken parametresi $a_0=2.99$ Å'dur. Martensite fazdaki kafes parametreleri ise $a=2.88$ Å, $b=4.12$ Å ve $\beta=96.8^\circ$ 'dir (Otsuka vd., 1971).

Austenite fazından martensite fazına geçiş sırasında veya rombohedral yapıda bir ara faz (R fazı) da görülebilir. Rombohedral yapının oluşmasına neden olan faktörler yaşlandırma, alaşımların aşırı nikel içermesi, termomekanik işlemler ve termal döngüler olarak sıralanabilir. Rombohedral fazın yapıda bulunması şekil hafızalı alaşımların histerezis bölgesinde 1-2 °C'lik bir atışa sahip olmasını sağlamaktadır. Bu durum çabuk şekil değişimi gerektiren kullanım alanlarında avantaj sağlamaktadır (Vural vd., 2008).

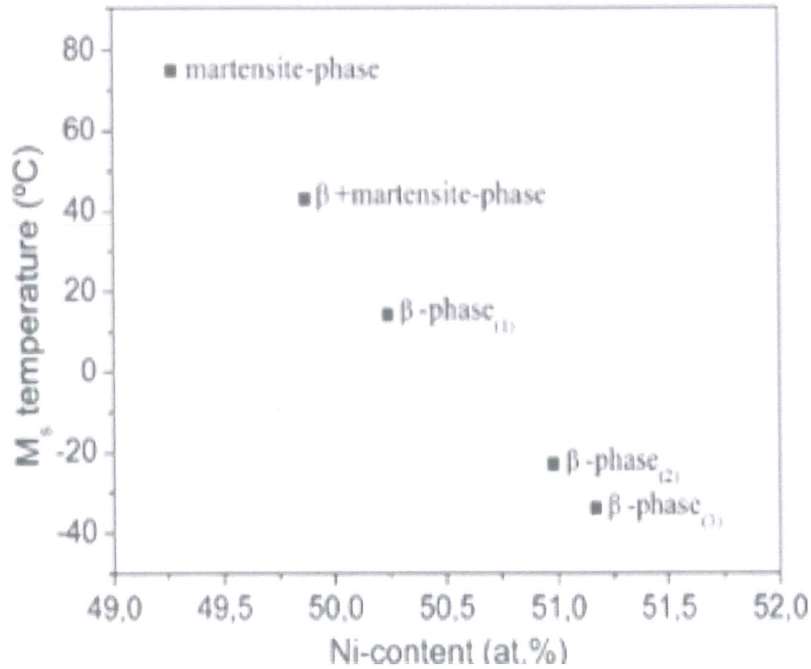


Şekil 2.5. Nitinol alaşımlarında faz dönüşümü

2.2.3. Alaşımdaki nikel oranının martensitik dönüşüm sıcaklığına etkisi

NiTi alaşımdaki nikel ve titanyum oranları alaşımın faz dönüşüm sıcaklığını büyük oranda değiştirmektedir. Atomik olarak % 48-52 nikel oranının bulunduğu aralıkta % 0.1'lik bir değişim 10 °C'den fazla martensite başlangıç (M_s) sıcaklığını değiştirmektedir. Atomca % 50 nikel oranından itibaren nikel oranı arttıkça M_s sıcaklığı oda sıcaklığına doğru yaklaşmakta, atomca nikel oranı % 51 ve üzeri oranlara çıktığında ise 0 °C ve altı sıcaklıklara düşmektedir (Dilibal, 2005).

Atomik olarak % 49-52 nikel içeren alaşımlar için yapılan deneysel çalışmalarda nikel oranındaki değişimlerin martensite başlangıç (M_s) sıcaklığına olan etkisi Şekil 2.6'da gösterilmektedir (Arciniegas vd., 2007).



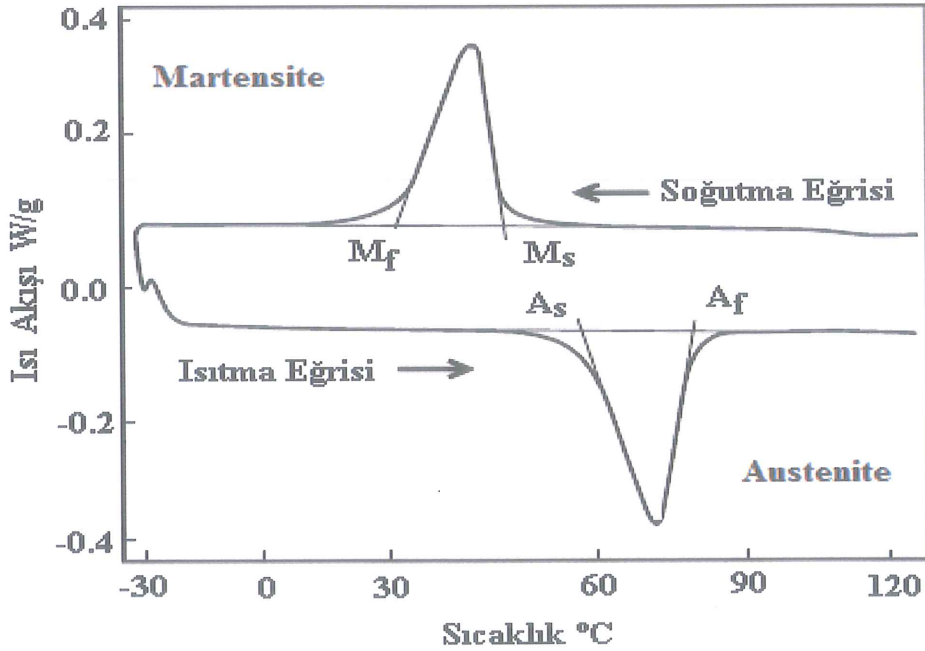
Şekil 2.6. M_s sıcaklığının alaşımdaki Ni oranına bağlı olarak değişimi (Arciniegas vd., 2007)

2.2.4. Martensitik dönüşüm sıcaklığını belirleme yöntemleri

Şekil hafızalı alaşımlarda dönüşüm sıcaklığını belirlemede iki en önemli yöntem vardır.

En çok kullanılan yöntem diferansiyel taramalı kalorimetredir (DSC). Bu yöntemle, alaşımdan alınan küçük bir numunenin ısıtılıp soğutulması ile göstereceği ekzotermik ve endotermik piklerin incelenmesiyle faz dönüşüm sıcaklıkları tespit edilir. DSC cihazı ile malzemelerin entalpi, özgül ısıları, ergime enerjileri, kristalleşme, yaşlanma, saflık ve faz dönüşümleri gibi fiziksel özellikleri belirlemektedir.

Diğer bir yöntemde, alaşım austenite ve martensite fazda öz direnç farklılıkları göstereceği için, alaşım ısıtılıp soğutulmuş olarak öz direnç-sıcaklık diyagramı elde edilebilir. Şekil 2.7’de DSC analizi ile ısıtma ve soğutma sonucu belirlenen faz dönüşümlerini göstermektedir.

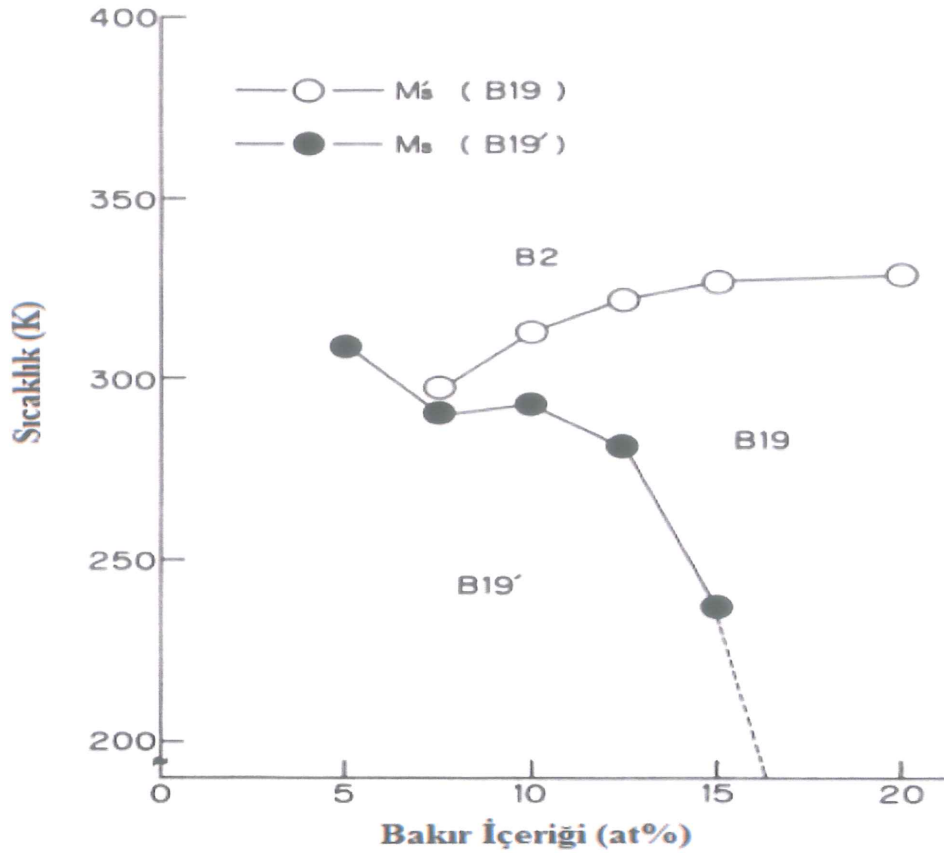


Şekil 2.7. DSC analizi ile ısıtma ve soğutma sonucu belirlenen faz dönüşümleri

2.2.5. NiTi alaşımlardaki faz dönüşümlerine katkı elementlerinin etkisi

Nikel-titanyum alaşımına üçüncü bir element katkısı alaşımın faz dönüşümlerini büyük ölçüde değiştirmektedir. Bu alanda özellikle TiNiCu alaşımı, bakırın alaşımın dönüşüm histerezisini daraltması sebebiyle ilgi uyandırmaktadır. $TiNi_{1-x}Cu_x$ alaşımında x 'in en büyük 0.6 (%30 Cu) değeri alaşımın dönüşüm histerezisini daraltmaktadır.

Cu ilavesi Şekil 2.8'te görüldüğü gibi çeşitli etkilere yol açar. İlk olarak, bakır içeriğindeki değişim ile dönüşüm sıcaklıklarında kayda değer bir değişme olmaz. İkinci olarak, dönüşüm durumu artan bakır içeriğiyle değişir; atomca $Cu \leq 7,5$ için $B2 \sim B19^I$, $7,5 \leq Cu \leq 15$ için $B2 \sim B19 \sim B19^I$, $Cu \geq 15$ için $B2 \sim B19$ dönüşümleri gerçekleşir. $B2 \sim B19$ dönüşümü, $B2 \sim B19^I$ dönüşümden daha küçük bir dönüşüm histerezisi gerektirir (Otsuka vd., 1998). Böylece dönüşüm histerezisi artan bakır miktarı ile ters orantılıdır. TiNiCu alaşımları aktüatör uygulamaları için kullanışlıdır.



Şekil 2.8. TiNiCu alaşımlarında bakır içeriğinin martensitik dönüşüm sıcaklığına etkisi (Otsuka vd., 1998)

2.2.6. NiTi şekil hafızalı alaşımların üretim yöntemleri

NiTi alaşımının üretiminde öncelikli olarak % 99.5'ten yüksek ticari saflıkta nikel ve titanyum kullanılması gerekir. Ergimiş titanyum, oksijene karşı çok etkileşimli olduğundan dolayı NiTi alaşımlar yüksek vakum altında eritilmelidir. Pota malzemesi olarak grafit veya kalsiyumoksit tercih edilir. Grafit pota kullanılması durumunda, oksijen kirlenmesi ihmal edilebilir düzeyde olur, ama bu sefer de karbon kontaminasyonu dikkate alınması gerekir. Ergime sıcaklığı 1723 Kelvin'den yüksek olan alaşımlar için grafit pota kullanımı uygun değildir. Fakat eş atomlu NiTi alaşımının ergime noktası 1510 K civarındadır. Karbon potada eritilerek uygun olarak hazırlanan ingotlar 200-500 ppm arasında karbon içerir. Bu seviyedeki karbon safsızlığı alaşımın şekil hatırlama özelliğini etkilemez (Dilibal, 2005).

NiTi şekil hafızalı alaşımların üretiminde sinterleme ve döküm yöntemi olmak üzere iki farklı yöntem kullanılmaktadır. Döküm metoduyla üretim vakum ark yöntemi, vakum indüksiyon yöntemi, plazma ark yöntemi ve elektron ışını ark yöntemiyle yapılmaktadır.

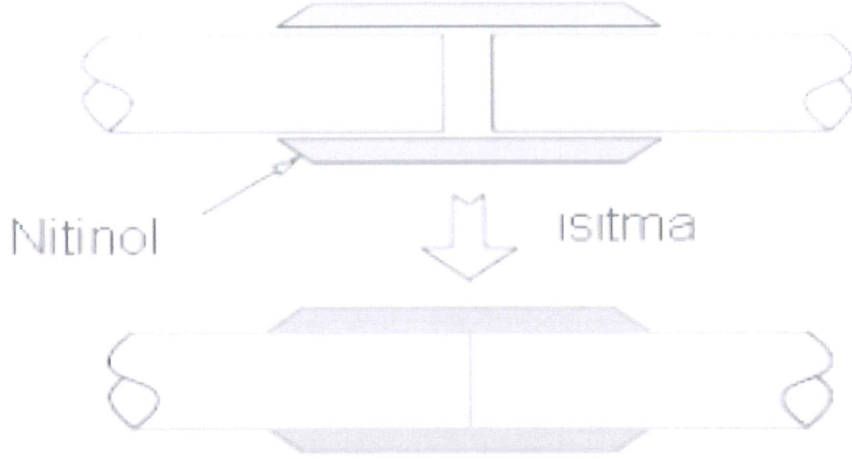
2.2.7. NiTi Şekil Hafızalı Alaşımların Uygulamaları

Nikel-titanyum şekil hafızalı alaşımlar termodinamik özelliklerinden dolayı geniş uygulama alanlarına sahiptir. En kolay başarılı Nitinol uygulamalarına örnek olarak gözlük çerçevesi ve mobil telefon anteni uygulamaları verilebilir.

Şekil 2.9' da gösterilen bağlantı elemanlarından yüz binden fazlası F-14 gibi gelişmiş uçaklarda uygulanmış ve bugüne kadar rapor edilen hiçbir hata olmamıştır (Huang, 1998).

Nitinol yüksek iç sürtünmesinden dolayı titreşim sönümlendirici ve izolasyon elemanı olarak da kullanılır. Aiken ve arkadaşları Ni-Ti şekil hafızalı alaşımların pasif enerji sönümlendiricisi olarak deprem sırasında yapılan sönümlendirme histerezislerini artırmak için kullanmalarını önermiştir. Maclean ve arkadaşları Ni-Ti alaşımları geniş uzay yapılarında; titreşim ve şekil kontrolü geri beslemesinde kullanmışlardır (Huang, 1998).

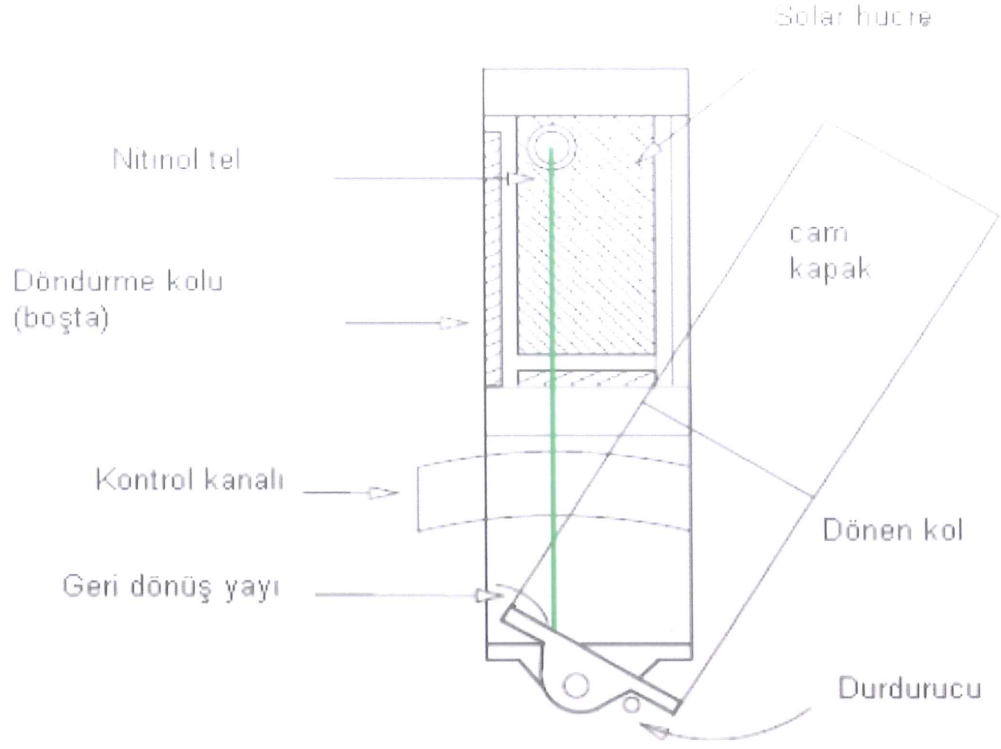
Nitinol ayrıca biyo uyumluluğundan dolayı medikal cihaz yapımında da kullanılmaktadır. Nitinol tellerden damarları desteklemek için üretilen vasküler stentler örnek verilebilir.



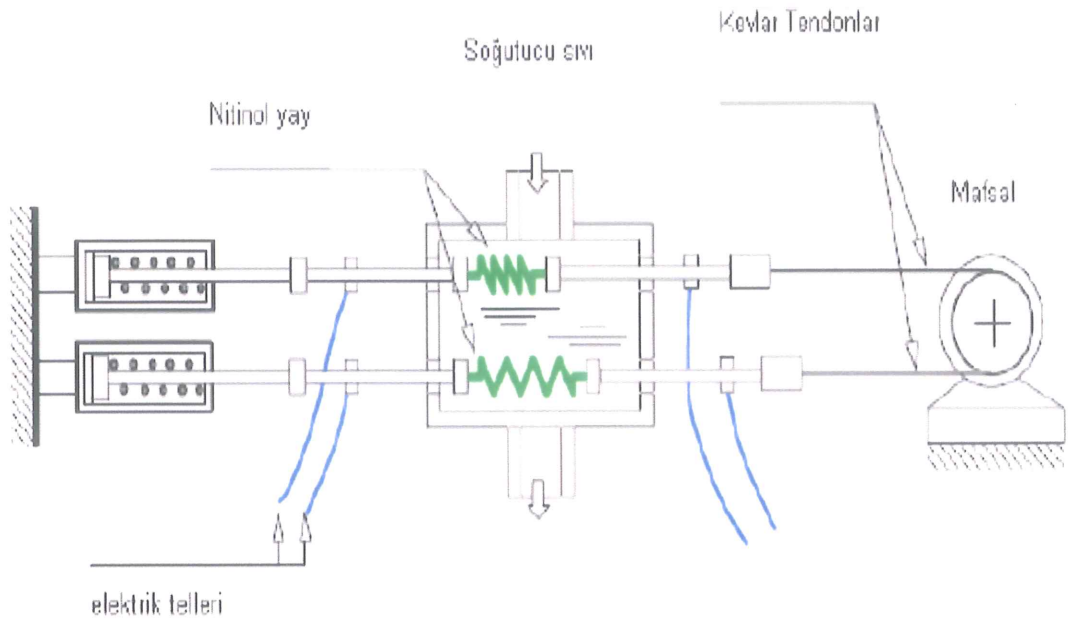
Şekil 2.9. Şekil hafızalı birleştirme elemanı (Huang, 1998)

Yakın tarihlerde Ni-Ti parçalar; Hubble Uzay Teleskopu'nun güneş panellerinin açılmasını tetikleyen mekanizmada, Mars Pathfinder Rover solar panellerinin cam kapaklarının açılmasında (Şekil 2.10), 0,06 kg ağırlığındaki, -100 °C'den +100 °C'ye dönebilen, maksimum 0,34 Nm çıkış torkunda çok eksenli dönme yapabilen çok hafif cihazlarda ve güneş paneli ayarlama mekanizmalarında kullanılmıştır (Huang, 1998).

Robotik alanda da birçok şekil hatırlamalı alaşımlar uygulaması gerçekleştirilmektedir. Şekil 2.11'de gösterilen doğrudan tahrikli bir robotik aktüatördür. Mafsal, Nitinol yayların ısıtılmasıyla ileri geri hareket ettirilebilir (Huang, 1998).



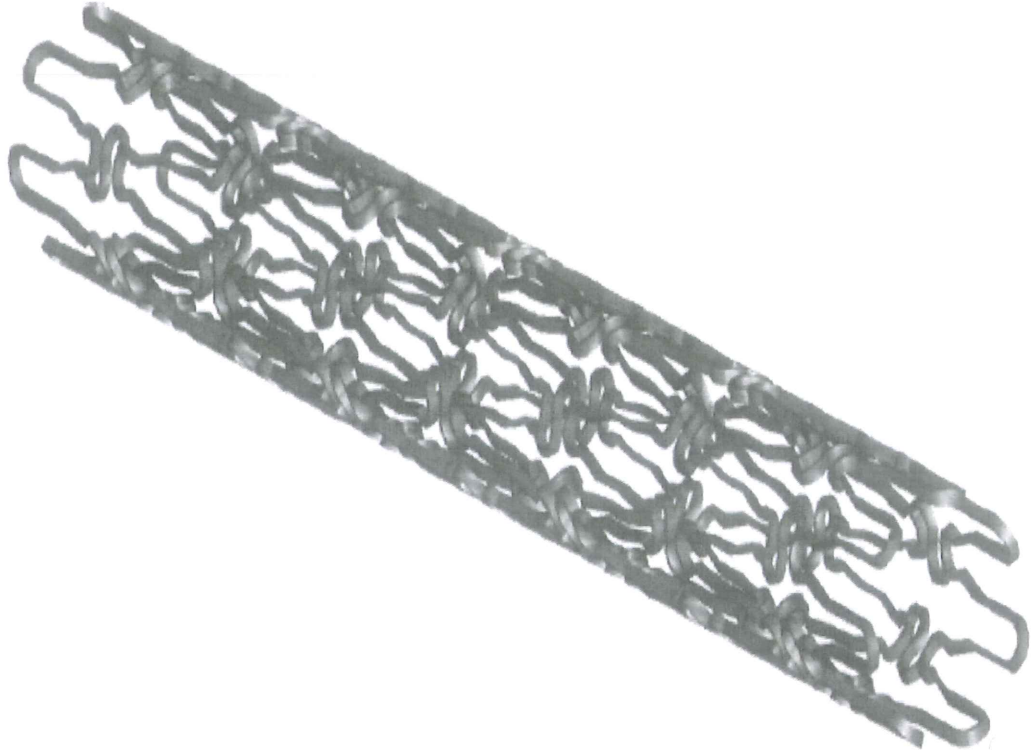
Şekil 2.10. ŞHA tahrikli dönen kol (Huang, 1998)



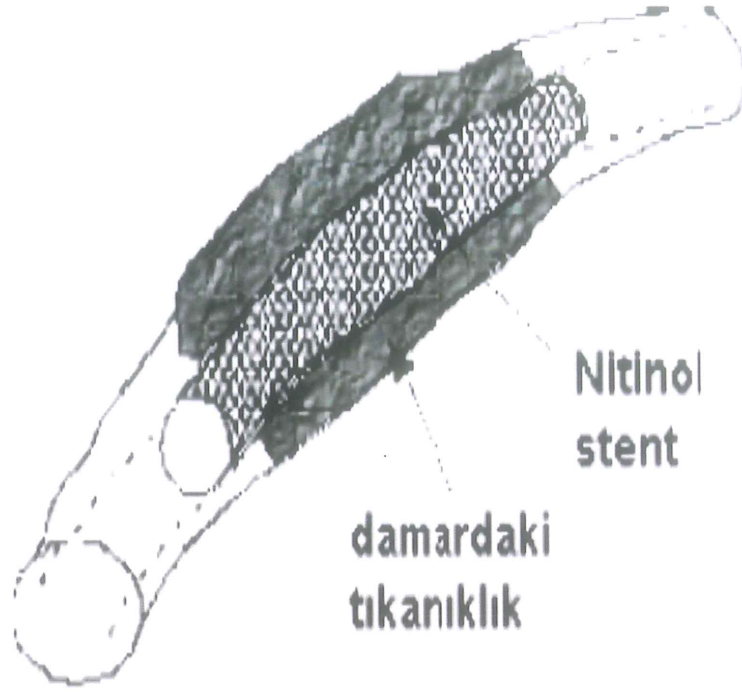
Şekil 2.11. Doğrudan tahrikli robotik ŞHA aktüatör (Huang, 1998)

NiTi alaşımları için diğer bir kullanım alanı da kalp damarları tedavisinde, anjiyoplasti tekniğinde kullanılan stentlerdir. Stent olarak bilinen kalıcı implant metal silindirler, damar duvarlarını desteklemek amaçlı kullanılır. Stentler iki tip olarak üretilir; balonla genişleyenler ve kendiliğinden genişleyenler. Balonla genişletilenler anjiyoplasti sırasında balonun stentin içinde yerleştirilmesi ve balonun Őiřirilmesiyle hem damarın hem de stentin genişletilmesiyle uygulanır. Balon ve kılavuz telin çekilmesiyle stent damar içinde yerleşik kalır ve damar duvarlarının geri büzülmesini önler. Nitinol stentler ise kendiliğinden genişleyen stentlerdir. Açık Őeklinde retilen Nitinol stent sıkıştırılır ve iletii sondanın içine yerleştirilir. Sonda hedef noktaya varınca, stent dışarı itilir ve dışarı doğru açılarak orijinal Şekline geri döner ve damar duvarlarını destekler. Nitinolün stent olarak kullanılmasındaki temel sebep süperelastik özelliğidir. Nitinol stentler telden, sarmal Őeritlerden, tüpten lazerle kesilerek ya da saçların asitle işlenmesiyle üretilir (Morgan, 2003).

Şekil 2.12'de tüpten lazerle kesilmiş Nitinol stent, Şekil 2.13'de Nitinol stentin damardaki konumu gösterilmektedir.



Şekil 2.12. Nitinol tüpten lazerle kesilerek üretilen bir stent modeli (Morgan, 2003)



Şekil 2.13. Tıkanık damarın NiTi stentle açılması (Huang, 1998)

Damarlarda oluşan kan pıhtıların kopması ve akciğere taşınması ile kalp krizi ile sonuçlanabilecek damar tıkanıkları, nefes darlıkları ortaya çıkabilmektedir. Akciğer embolisi denilen bu vaka için bazı hastalarda etkisizdir. Bu hastalarda pıhtılar akciğere ulaşmadan önce toplardamar filtreleri ile gerçekleştirilen mekanik bir müdahale ile yakalanabilir. Bu filtrelerin farklı tipleri mevcuttur. Çelik ile titanyum filtreler giriş için hastanın vücudunda 3.3-4 mm' lik bir delik açılmasını gerektirir. Nitinol filtreler ise bu sadece 2.00 mm'dir. Bununla beraber Nitinol filtrelerle yapılan operasyonlar daha kolay uygulanır ve kontrol edilebilirdir (Morgan, 2003).

NiTi alaşımların daha birçok kullanım alanı ve uygulaması mevcuttur. Özellikle savunma teknolojileri ve uzay araştırmalarında yaygın hale gelmiştir.

2.3. Nikel-Titanyum Şekil Hafızalı İnce Filmler

Şekil hafızalı alaşımların ince film olarak üretilmesi özellikle mikro-elektro-mekanik sistemler (MEMS) alanında yeni bir başlangıç olmuştur. Diğer tüm ŞHA'lar arasında NiTi alaşımlar; yüksek güç/ağırlık oranıyla yüksek miktarda güç üretebilmeleri, yüksek miktarda toplanabilir gerilimleri, yüksek elektrik ve korozyon dirençleri, düşük enerji tüketimleri ve uzun şekil hafıza çevrim ömürleri ile ince film olarak da en çok ilgi çeken ve geliştirilmeye çalışılan alaşım sistemi olmuştur (Tabib-Azar vd., 1999). İnce film NiTi alaşımların kütlesi de çok daha düşük olduğundan, ısıtılmaları ve faz dönüşümlerinin gerçekleşme süresi de önemli ölçüde kısalmaktadır. Ancak belirlenmiş geri dönüşümlü gerilim oranları ve dönüşüm sıcaklıklarında kitlesel olarak üretilmeleri hala da problemlili bir konu olmakla beraber standart litografi teknikleriyle işlenebilmekte ve mikrosistemler için yeterli oranda güç çıkışı sağlayabilmektedir. Dolayısıyla geçen on yıl içerisinde mikro kavrayıcılar, mikro valfler, mikro pompalar, mikro endoskoplar ve benzeri birçok uygulama açısından incelenmiş ve denenmişlerdir (Bellouard, 2008). NiTi ince filmlerde faz dönüşümlerinin hareket üretmesi dışında; alaşımın fiziksel, elektriksel, kimyasal, mekanik ve optik özelliklerini de değiştirdiği bilinmektedir (Fu vd., 2004).

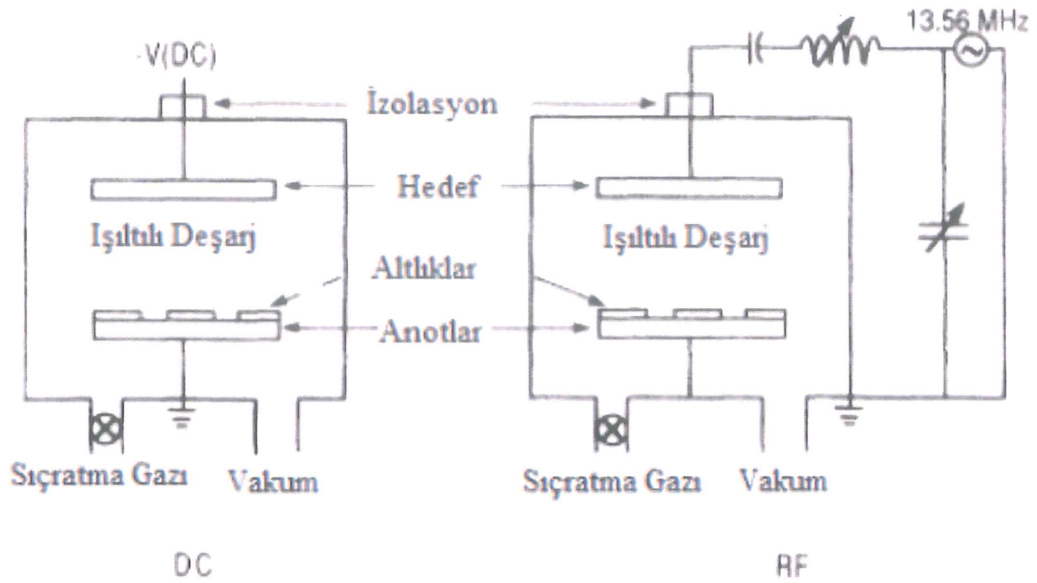
Ni-Ti ince filmlerin gelişimi ilk olarak 1983 yılında Sekiguchi ve çalışma arkadaşları tarafından kristalin bir şekilde üretildiklerini görürüz. 1986' da Kim ve arkadaşları tarafından NiTi ince film ilk kez manyetik alanda sıçratma tekniği ile üretilmiş ve R-fazı dönüşümü gözlenmiştir (Otsuka vd., 2005). 1990' da Walker ve arkadaşları tarafından sıçratma yöntemi ile NiTi film üretilmektedir. Fakat üretilen film amorf yapıdadır. 1990 yılında TiNi Alloy Company' de çalışan Bush ve Johnson tarafından, DC manyetik alanda sıçratma yöntemiyle eş atomlu NiTi film üretildiğini, sonrasında 723 K'de tavlansak kristalleştirilip 100 °C'nin altında bir dönüşüm sıcaklığını gözlemişlerdir (Telli, 2004). Diğer yıllarda NiTi ince filmler üzerinde çok sayıda makale ve araştırma yayınlanmıştır. Son zamanlarda ince filmlerde çift yönlü şekil hafıza etkisinden yararlanmak için yeni metotlar geliştirilmiş olsa da, ince filmlerde genelde tek yönlü şekil hafıza etkisinden yararlanılmaktadır. Bu da ilk kez Kuribayishi tarafından gerçekleştirilmiştir (Telli, 2004).

2.3.1. NiTi şekil hafızalı ince filmlerin üretim yöntemleri

Nikel –titanyum şekil hafızalı ince filmlerin üretilmesinde fiziksel buhar biriktirme yöntemleri kullanılır. Fiziksel buhar biriktirme yöntemleri, sıçratma ve ısısal buharlaştırma olmak üzere iki gruba ayrılır.

Ni-Ti ince filmler en yaygın olarak sıçratma yöntemi ile üretilmektedir. Bunun yanı sıra lazer ablasyonu, iyon demeti, katodik ark yöntemleriyle üretildikleri bilinmektedir. Fakat sıçratma ve manyetik alanda sıçratma (magnetron) dışındaki yöntemlerde, film kalınlığı ve kompozisyonunda film boyunca değişkenliklerin daha çok saptandığı bildirilmektedir (Fu vd., 2004).

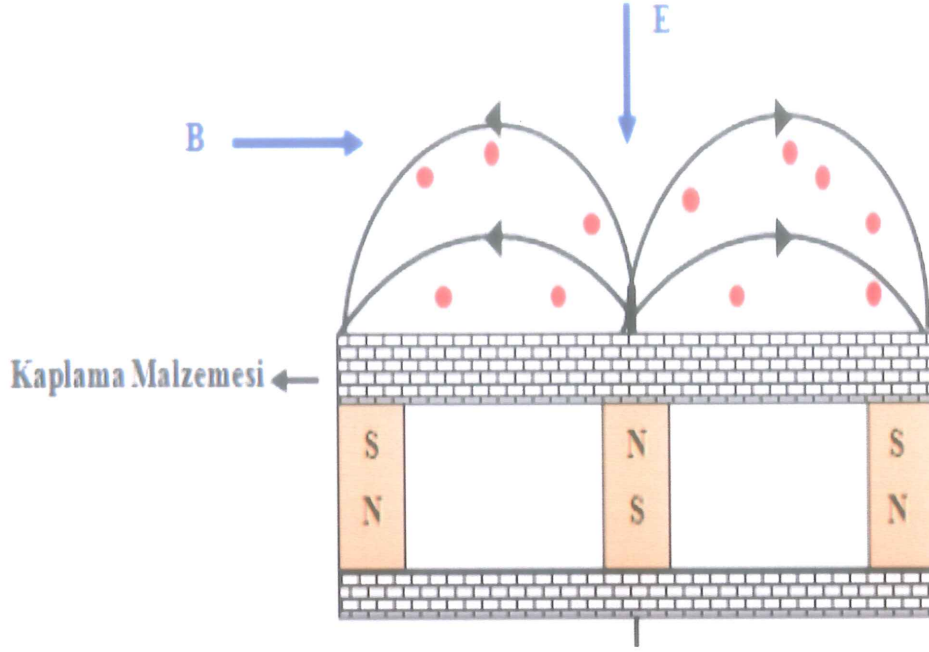
NiTi ince filmlerin üretilmesinde sıçratma yöntemi; momentum transferi sayesinde, belli bir hedef yüzeyinden partiküllerin tahliye ederek, istenilen altlık üzerinde biriktirilmesidir. Bütün işlem basınç düzeyi 10^{-6} ile 10^{-10} Torr arasında olan vakum altında gerçekleştirilir. Hedef malzeme yüzeyinden partiküllerin tahliyesi, yüzeyin iyonlarla bombardımana uğratılmasıyla gerçekleştirilir. İyon bombardımanı sağlamanın en yaygın yolu ise, ortama yüksek ağırlıklı inert gazı vererek (1 ile 100 mTorr basınçta) plazma oluşturulmasıyla sağlanır (Telli, 2004). Şekil 2.14'de sıçratma sistemi gösterilmektedir.



Şekil 2.14. Sıçratma sisteminin şematiği (Ohring, 1991)

Sıçratma metodunda altlık üzerine kaplanacak olan malzemeler aynı zamanda sistemde katot görevindedir. Katota uygulanan yüksek potansiyel fark, elektronların katot yüzeyinde birikmesine, katotun şarj olmasına neden olur. Belli bir değerden sonra, katot yüzeyinden elektronlar ayrılmaya başlar, ortamdaki inert gaz atomlarıyla çarpışan elektronlar, gaz atomlarından elektron kopartarak onları iyonize ederler. Yine gaz atomlarından ayrılan elektronlar da anota doğru yol alırken diğer gaz atomlarıyla çarpışarak onları iyonize ederler. Ortamdaki iyon ve elektron yoğunluğu belli bir değere ulaştığında parlama gerçekleşir ve ışıltılı deşarj denilen olay başlar. Ortamdaki pozitif iyonlar ise negatif katota doğru yönelerek, katot yüzeyine çarparlar. Bu çarpışma esnasında, çarpan pozitif iyonlar yüzeyden içeri girebilir, geri saçılarak enerjilerini yitirebilir veya yüzeyden atom kopartabilirler. Bu yüzden kopartılan atomlar, anot üzerinde birikerek film oluştururlar (Aydoğan, 2009).

Ni-Ti ince filmlerin üretilmesinde manyetik alanda sıçratma yöntemi de yaygın kullanılan yöntemlerdendir. Manyetik alanda sıçratma yönteminde hedef malzeme su soğutmalı mıknatıs veya elektromıknatıslardan oluşan tutucunun üzerine yerleştirilmiştir. Mıknatısın bir kutbu kaplama malzemesinin merkez eksenine, ikinci kutbu kaplama malzemesinin kenarlarına yerleştirilmiştir. Mıknatısların bu şekilde düzenlenmesi, elektrik ve manyetik alanların kaplama malzemesinin üzerinde birbirine dik olmasını sağlamaktadır. Plazmada elektronlar $E \times B$ yönünde hareket ederler. Şekil 2.15’de görüldüğü gibi elektronların $E \times B$ yönündeki hareket yolu, kaplama malzemesinin yüzeyine paraleldir ve kapalı halka oluşturur (Cansever, 2001). Manyetik alanda sıçratma yöntemi, sıçratma yöntemine ilave olarak, birikme hızını ve sıçratma verimini artırmak için hedef malzeme üzerinde bir manyetik alan oluşturulur.



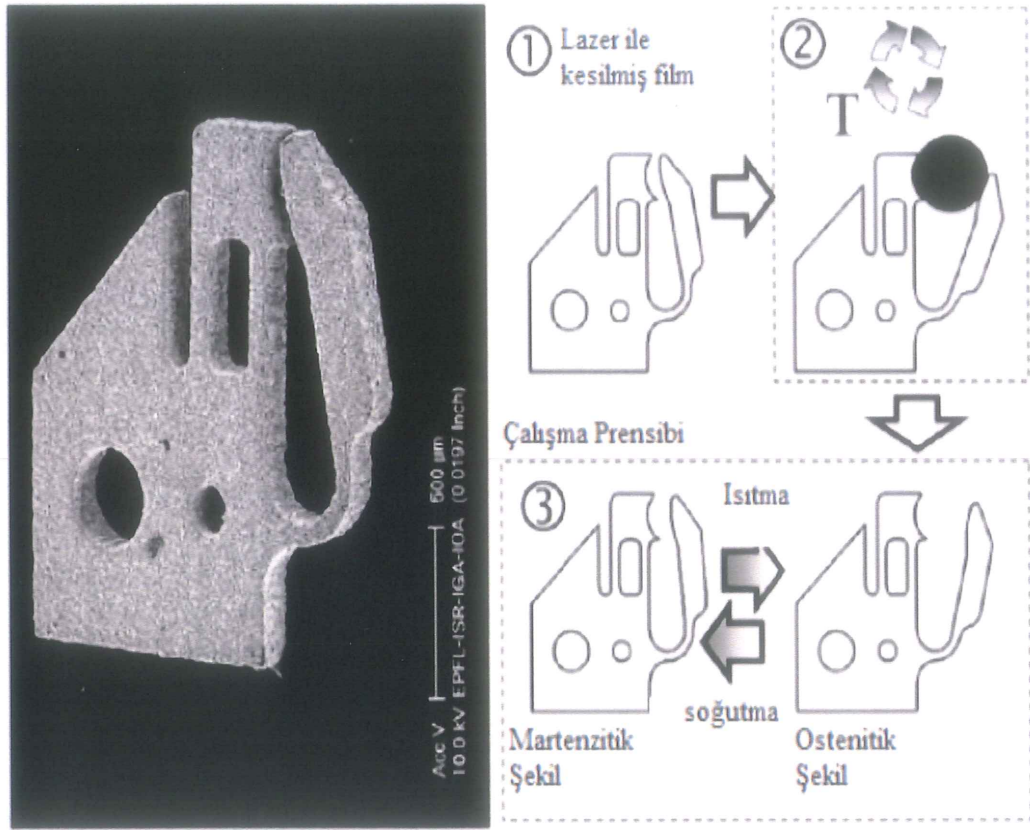
Şekil 2.15. Manyetik sıçratma mekanizması (Cansever, 2001)

NiTi filmlerin üretilmesinde, istenilen bileşimde film elde etmek için ona göre alaşımlar katot hedefler kullanılır. Ancak genellikle filmdeki Ti oranı düşük çıkar. Bu da nikel-titanyum sıçratma verimlerinin farklılığından kaynaklanır. Sıçratma verimi; katot yüzeyine çarpan iyon başına yüzeyden ayrılan atom olarak adlandırılabilir. Bu filmdeki bileşim farklılığı NiTi filmlerde en çok karşılaşılan sorunlardan biridir ve sadece sıçratma yöntemine özgü değildir. Diğer buharlaştırma yöntemlerinde de genellikle film, buharlaştırma kaynağından daha düşük Ti veya yüksek Ni içerir. Dolayısıyla kompozisyon kontrolü genellikle hedef atom üzerine ya da buharlaştırma kaynağına Ti ilavesi sağlanır. Kaplama sırasında altlık sıcaklığı 473 K' dan düşük olduğu durumlarda filmler amorf veya amorf benzeri yapıda olur. Kristalizasyon film bileşimine bağlı uygun sıcaklıkta vakum ortamda tavlama ile elde edilir. NiTi ince filmlerde amorf durumundan kristal yapıya geçilmesi, dökme malzemelerdekine göre çok çok küçük tane boyutu oluşmasını sağlar filme daha iyi mekanik özellikler kazandırır (Otsuka vd., 2005).

Genel olarak elde edilen filmin özelliklerinin bileşim, ısıl işlemler, kontaminasyon, termo-mekanik işlemler gibi metalurjik faktörlere altlık-hedef mesafesi, altlık sıcaklığı, vakum odası basıncı, kaplama hızı vb. gibi parametrelerine bağlı olduğu bilinmelidir (Fu vd., 2004).

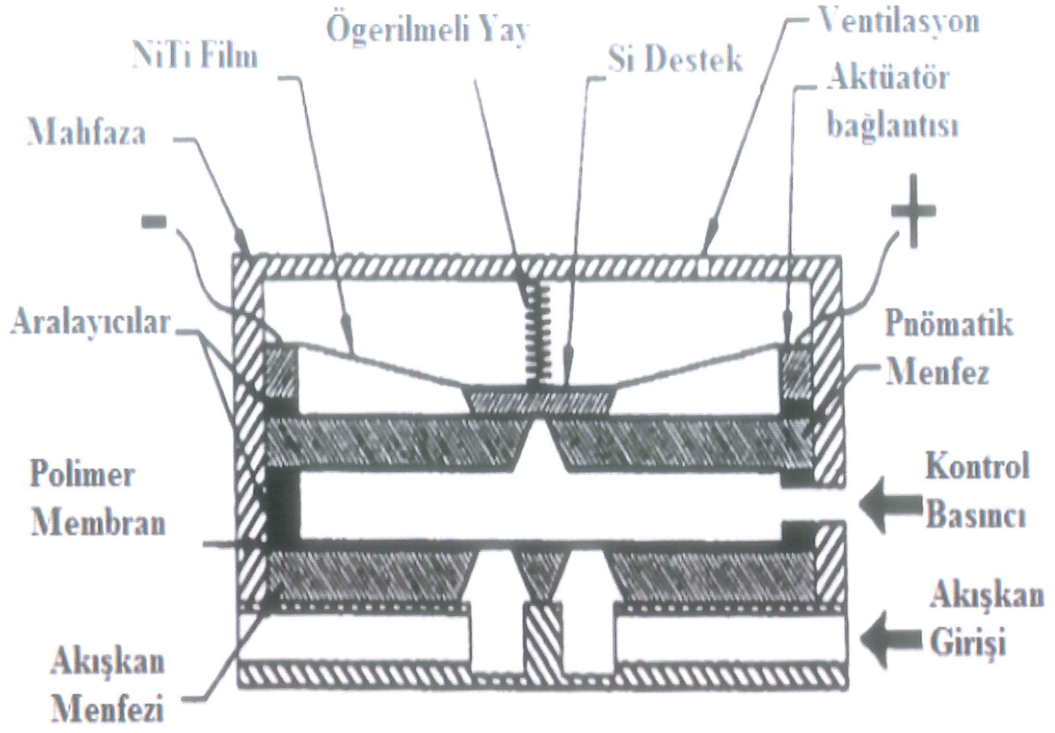
2.3.2. NiTi şekil hafızalı ince filmlerin uygulamaları

NiTi ince filmlerin MEMS alanında birçok farklı uygulaması mevcuttur. Şekil 2.16'de mikro tutucu, şekil hafızanın nasıl kazandığını göstermek adına iyi bir örnektir. Burada tutucu yine M_f sıcaklığının altında deforme edilip, A_f üstüne ısıtılırken şekil değişimi engellenmiştir. Daha sonra parçaya M_f - A_f sıcaklıkları arasında 100 ısıl çevrim uygulanmıştır. Isıl işlemler sırasında oluşturulan iç gerilmeler sayesinde parça şekil hafızası kazanmıştır (Aydoğan, 2009).



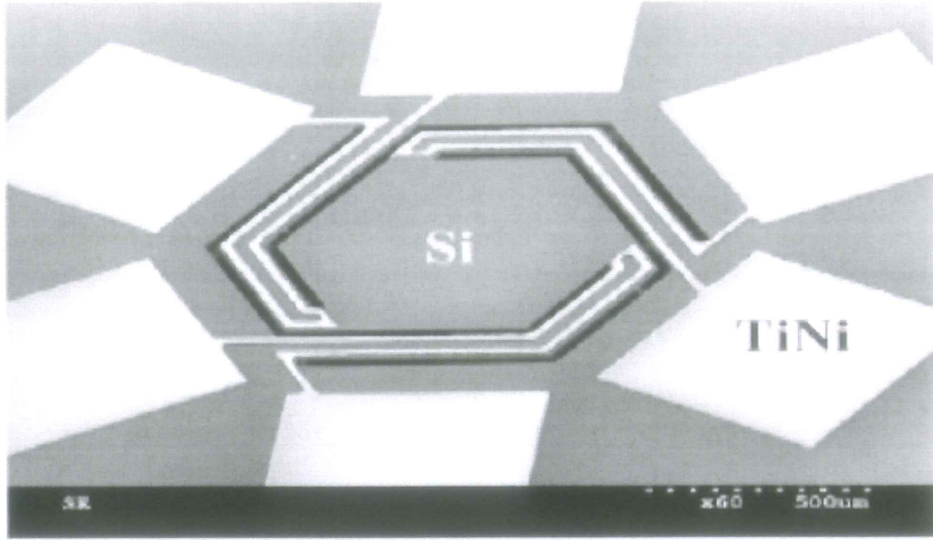
Şekil 2.16. NiTi ŞHA mikro tutucu (Bellouard, 2008)

Bir diğer uygulama olarak da önerilmeli yay kullanılan mikro valf örnek verilebilir. Şekil 2.17' te NiTi ŞHA ince film içeren valfin çalışma mekanizması görülmektedir. Oda sıcaklığında NiTi film M_f sıcaklığını altındayken önerilmeli yay filmi iterek deforme eder ve valf kapanır. Isıtma ile film A_f sıcaklığının üstüne çıkarken şekil değiştirerek yayı geri iter ve valfi açar (Aydoğan, 2009).

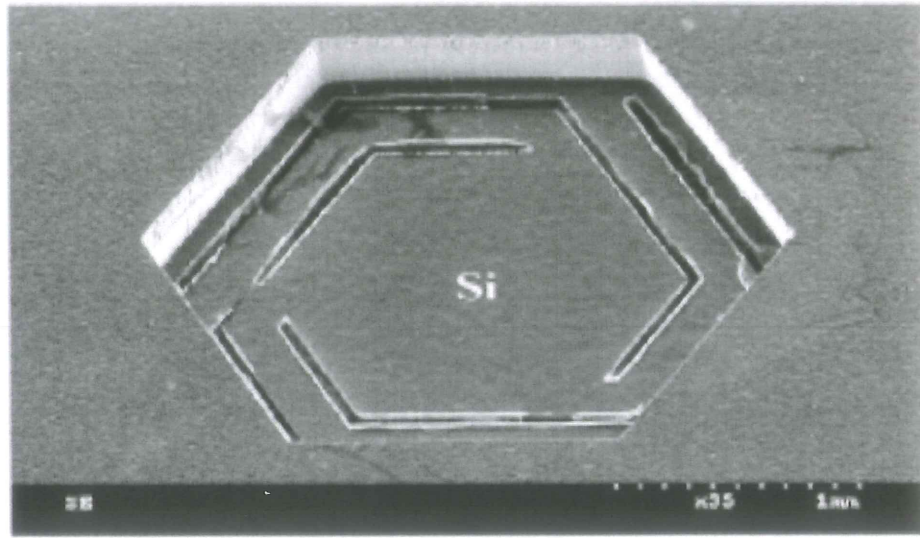


Şekil 2.17. NiTi ŞHA film içeren mikro valf (Bellouard, 2008)

Farklı bir örnek olarak düz panel ekranlarda kullanılan mikro ayna sistemleri örnek verilebilir. Şekil 2.18’de verilen sistemde silisyum parça ayna işlevindedir ve NiTi/Si demetlerinden oluşan aynayı çevrelemiş kollar ise aktüatördür. Sistemde, NiTi/Si demetlerinin elektrik akımıyla ısıtılarak şekil değiştirmeye zorlanmasıyla, kolların eğilmesi ve silisyum aynanın hareket ederek açının değişmesi sağlanmaktadır. Üsten ve alttan görünüşü şekilde belirtilmiştir (Aydoğan, 2009).



(a)



(b)

Şekil 2.18. TiNi mikro ayna yapısı; NiTi/Si demetinden oluşan aktüatör kollar. a) üstten görünüş, b) alttan görünüş (Fu vd., 2004)

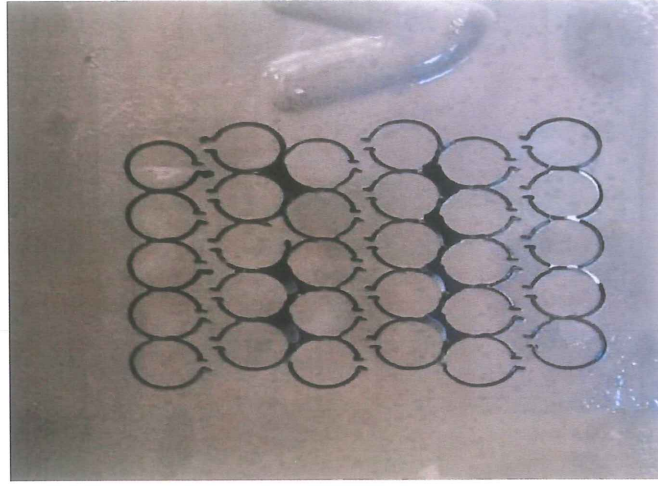
3. MALZEME VE YÖNTEM

3.1. Örneklerin Hazırlanması

Bu tez çalışmasında, Ti-Ni ve Ti-Ni-Cu ince filmler RF magnetron-sputtering yöntemi ile elde edilmiştir. İnce filmleri üretebilmek için öncelikle yüksek saflıkta (%99,9) Ti hedefler (2inch çapında ve 1cm kalınlığında), Ni ve Cu levhalar (1cm kalınlığında) temin edilmiştir. Ti hedefler üzerine Afyon' da bir mermer işleme tesisinde bulunan su jeti sistemi (Şekil 3.1.(a)) ile 1cm çapında oyuklar açılmıştır. Daha sonra bu oyuklar içerisine yine su jeti kullanılarak kesilen 1cm çapında Ni ve Cu hedefleri pres yardımı ile yerleştirilmiştir (şekil3.1.(b) ve şekil 3.1.(c)). Elde edilen Ti-Ni ve Ti-Ni-Cu hedefler Si alt taş üzerine ince film elde etmek için kullanılmıştır. RF magnetron-sputter sistemi ile farklı RF frekanslarında ve farklı sürelerde alt taş üzerine ince filmlerin büyütülmesi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen ince filmlerin görüntüsü şekil 3.2 de verilmiştir. Elde edilen ince filmler 500 °C'de farklı sürelerde (1-2-3 saat) ısı işleme tabi tutulup su içerisinde soğutulmuştur. Daha sonra Si alt taş üzerindeki filmler elmas uçlu metal kesicilerle kesilerek ince parçalar haline getirilmiştir ve deneylerde kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan ısı işleme fırını ve elmas uçlu metal kesicinin fotoğrafı Şekil 3.3. ve Şekil 3.4' de verilmiştir.



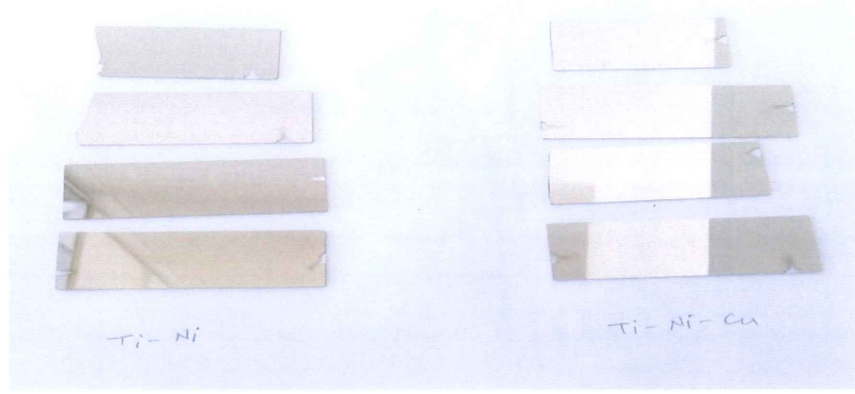
Şekil 3.1.(a) Su jeti sistemi



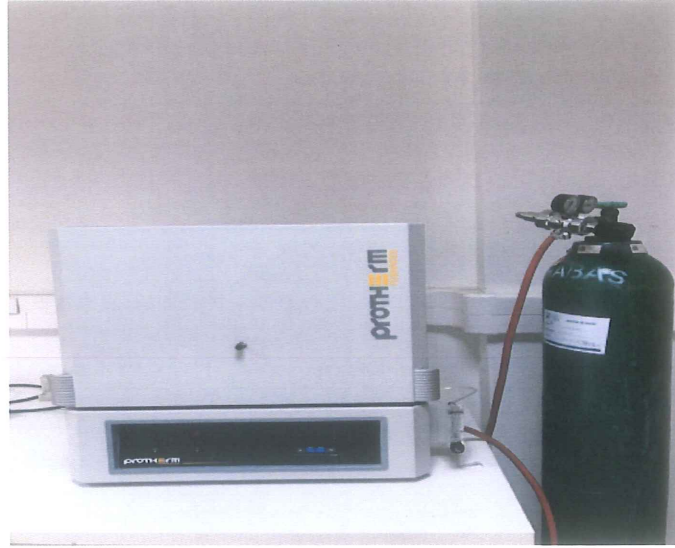
Şekil 3.1.(b) Ni levhanın kesilmesi



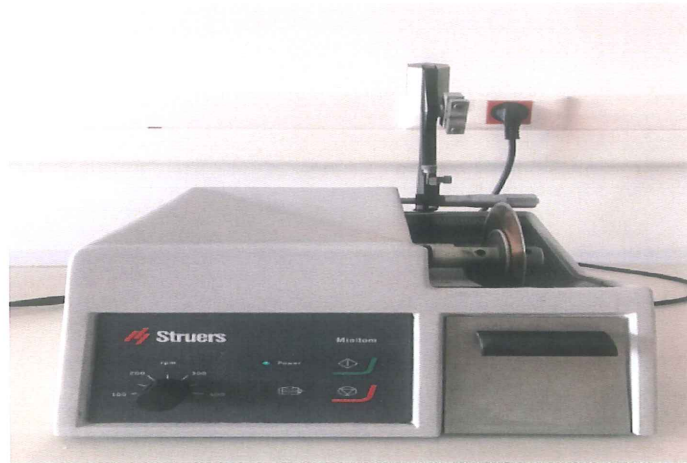
Şekil 3.1.(c) Ni ve Cu hedeflerin yerleştirilmesi



Şekil 3.2. Üretilen örneklerin görüntüsü



Şekil 3.3. Isıl İşlem Fırını



Şekil 3.4. Elmas Uçlu Metal Kesici

3.2. Yapısal Analiz Teknikleri

Bu tez çalışmasında üretilen örneklerin yapısal özellikleri x-ışınları kırınım yöntemi, geçirimli elektron mikroskobu, enerji dağılımlı x-ışınları spektroskopisi kullanılarak belirlenmiştir.

3.2.1. X-ışınları kırınım analizi (XRD)

Kristal yapı karakterizasyonlarında sıkça kullanılan tekniklerden birisi x-ışınları kırınımıdır. Bir x-ışını kırınım cihazı x-ışını tüpü, monokromatör ve dedektör olmak üzere üç temel parçadan oluşmaktadır.

X-ışınları kırınım ölçümlerinde tek dalga boyuna sahip bir x-ışını demeti kullanılmaktadır. X-ışınları tüpünde yüksek enerjili elektronların hedef bir metal (yüksek saflıkta bakır gibi) yüzeye çarpmasıyla üretilen x-ışınları demeti özel yarıklardan geçerek paralel hale getirilmekte ve örnek üzerine odaklanması sağlanmaktadır. Örnek üzerinden kırınıma uğrayan x-ışınları yine aralıklardan geçerek dedektöre ulaşmakta ve bragg yasasına göre numuneye ait kırınım deseni alınabilmektedir. Sonuçta kırınım açısına (2θ) karşılık kırınım yoğunluğunu (I) gösteren bir spektrum elde edilmektedir. Bu spektrum incelenmek istenen örneğin parmak izi gibi tanımlanabilir. Kırınım desenindeki her bir pik bir kristalografik düzleme karşılık gelmektedir. Ayrıca üretilen malzemenin örgü parametreleri, parçacık boyutları hesaplanarak kristal yapısı bulunmaktadır.

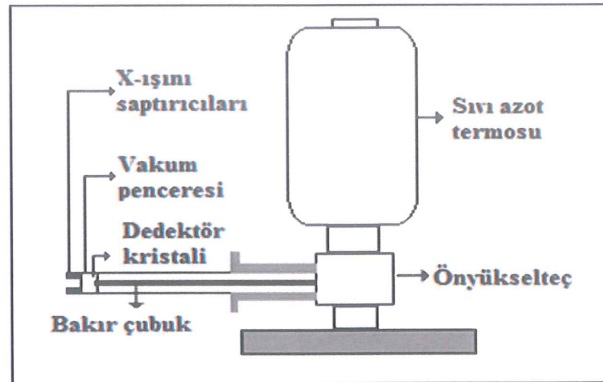
Bu tez çalışmasında üretilen örneklerin x-ışınları kırınım ölçümleri Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi Araştırma Laboratuvarları Merkezi'nde bulunan Rigaku marka SmartLab modeli x-ışını kırınım cihazı ile oda sıcaklığında $20^\circ \leq 2\theta \leq 80^\circ$ aralığında $0,004^\circ$ adım boyu ile $0,04$ derece/dak tarama hızında yapılmıştır. Kullanılan cihaza ait bir fotoğraf Şekil 3.5'de verilmiştir.



Şekil 3.5. Rigaku Marka Smartlab X-Işını Kırınım Cihazı

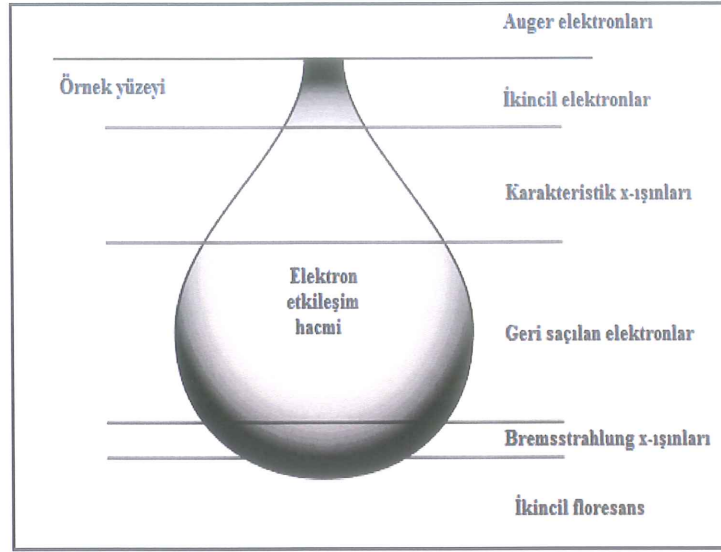
3.2.2. Enerji dağılımlı x-ışınları spektroskopisi (EDS)

EDS bir örneğin içerisinde bulunan elementleri ve element miktarını belirlememize yarayan bir analiz yöntemidir. EDS ölçüm sistemi elektron mikroskopları (SEM ya da TEM gibi) ile bütünleştirilmiş bir sistemdir. Bu sistem bir x-ışınları dedektörünün elektron mikroskobuna entegre edilmesiyle oluşur. Şekil 3.6' da tipik bir x-ışını dedektörünün yapısı görülmektedir (Garratt-Reed ve Bell, 2005).



Şekil 3.6. X-Işını Dedektörü

Elektron demetinin örnek yüzeyine ulaştıktan sonra örnek atomları ile yüzeye gönderilen elektronlar arasında birçok etkileşme (elektron-elektron, çekirdek-elektron) meydana gelir. Etkileşmeler sonucu açığa çıkan farklı ışınlar Şekil 3.7’de verilmiştir.



Şekil 3.7. Örnek ile Örnek Yüzeyine Gönderilen Elektronların Etkileşmesi

EDS ölçümlerinde tüm bu etkileşimler sonucu açığa çıkan ışınlar ölçümün doğruluk ve hassasiyetini önemli ölçüde belirler. EDS ölçümünde katı bir örneğin elektron demeti ile bombardıman edilmesi sonucunda örnekten salınan x-ışınları kullanılır.

Bu tez çalışması kapsamında sentezlenen örneklerin EDS analizleri Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi Araştırma Laboratuvarları Merkezi’nde bulunan, JEOL JEM 7100F marka yüksek çözünürlüklü elektron mikroskobuna bağlı Oxford EDS sistemi ile yapılmıştır.

3.3. Termal Analiz Teknikleri

Ni-Ti ve Ni-Ti-Cu ince filmlerinde faz dönüşüm sıcaklıklarını belirlemek için Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (DSC) yöntemi kullanılmıştır. Termal analizler Türkiye Atom Enerji Kurumu (TAEK) Ankara/Sarayköy Nükleer Araştırma Merkezi'nde (SANAEM) yapılmıştır. Kullanılan DSC' ye ait görüntü Şekil 3.8' de verilmiştir.



Şekil 3.8. TA Instruments DSC 2010

Bir minerale veya bir maddeye uygulanan ısı işlemlerle, ısıtma veya soğutma sırasında meydana gelen reaksiyonlar nedeni ile kütle ve enerji değişimleri bulunmasında kullanılan yöntemlere, termal analiz yöntemleri denir (Bülent, 1999).

Termal analiz metodları polimerlerin, alaşımların, killerin, minerallerin, tuzların, tuz karışımlarının, farmasötiklerin incelenmesinde ve kalite kontrol amaçlı kullanılır.

En yaygın kullanılan yöntemler, maddenin bileşimi konusunda en doğru sonuçları veren TG (termogravimetri), DTA (diferansiyel termal analiz) ve DSC (diferansiyel taramalı kalorimetri) dir. Bunlar günümüzde ayrı ayrı uygulanabildiği gibi aynı örneğin, her üç ısı eğrisi ile fırın sıcaklığının değişiminin aynı anda kaydedildiği karışık sistemler olarak da uygulanabilmektedir (Copp, 1986).

Birçok durumda tek bir ısı analiz yönteminin uygulanması araştırma konusu olan madde ile ilgili yeterli bilgi vermemektedir. Bu nedenle, TG verilerine DTA verileri de eşlik etmektedir. Isıl analiz sonucu oluşan eğrilerin doğruluğu ve

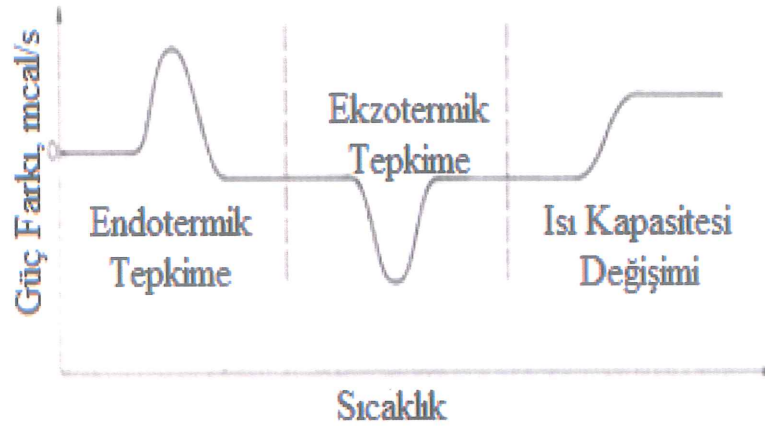
tekrarlanabilirliği, eğrilerin şekilleri ve karakteristik sıcaklıklarını etkileyen birçok deneysel faktörlere bağlıdır (Bülent, 1993).

3.3.1. Diferansiyel taramalı kalorimetri (DSC)

DSC, test edilecek madde ile referans arasındaki sıcaklık farkı sıfır yapmak için gerekli enerjinin zaman yada sıcaklığa karşı kaydedilmesidir. Bu yöntem entalpi değişimleri hesaplamasında kullanılır.

Bu yöntemde, örnek ve referans maddeleri, farklı ısıtıcı ve sıcaklık ölçerler ile irtibatlıdır. Her iki maddeye, hızı elektronik olarak kontrol edilen enerji verilerek sıcaklıklarının değişmemesi sağlanır.

DSC eğrileri, eklenen sıvının sıcaklığa karşı çizilmesi ile elde edilen grafikleridir (Şekil 3.9.) pikin altında kalan alan, tepkimede absorplanan veya açığa çıkan ısı ile pik yükseklikleri ise tepkime hızıyla doğru orantılıdır. ΔH pozitif ise, örnek ısıtıcısına ısı eklenir ve pozitif bir sinyal elde edilir. ΔH negatif ise, karşılaştırma maddenin ısıtıcısına ısı eklenir ve negatif bir sinyal elde edilir. Bu piklerin integrali örnek maddesinin aldığı veya verdiği ısı miktarına eşittir (Yıldız, Genç ve Bektaş, 1997).



Şekil 3.9. DSC Analizi ile Gözlenebilecek Üç Olaya Ait Eğriler (Yıldız, Genç ve Bektaş, 1997)

DSC cihazları örnekleri 700° C'ye kadar ısıtılabilme özelliğine sahiptirler ancak sonyıllarda örnekleri 1600 °C' ye kadar ısıtılabilen bazı DSC cihazları yapılmıştır (Yariv, 2004). Bu yöntemde örnek ve karşılaştırma maddesi birbirinden yalıtılmış ayrı kaplara yerleştirilir. Isıtıcılar örnek ve karşılaştırma maddesinin hücrelerine mümkün olduğu kadar yakın yerleştirilir. Termoçift bir sıcaklık farkı gösterdiğinde, soğuk olan tarafa sıcaklık eşitleninceye kadar ısı eklenir. Sıcaklıkları eşit tutabilmek için uygulanan ısıtma hızı, örnek sıcaklığının fonksiyonu olarak kaydedilir (Yıldız, Genç ve Bektaş, 1997).

3.4. RF Magnetron Sputter

Hedef olarak kullanılan bir malzeme enerjik parçacıklar ile bombardıman edilerek yüzeyinden atomlarının ya da moleküllerinin sökülmesi işlemine kopartma (sputtering) denilmektedir. Etkili bir kopartma işlemi için gerekli olan parçacıklar atomik boyutlarda olmalıdır. Elektronlar gerekli olan momentumu sağlayamayacak kadar küçükken, büyük parçacıklar da tek bir atom veya molekülle etkileşemeyecek kadar büyük olabilir. Bu nedenle kopartma işlemi için genellikle asal gazlar kullanılır. Saf halde en kolay bulunabilen gaz olan argon gazı (Ar) kopartma işlemi için idealdir. Kopartma işlemi sırasında parçacıkların elektrik veya magnetik alan altında kolayca hareket edebilmesi açısından argon gazı iyonlaştırılarak Ar⁺ iyonları ile hedef malzeme bombardıman edilir (Demirel, 2014).

Bu yöntemde, elektrotlar arasına radyo frekansında titreşen gerilim uygulanır. Elektronlar, yeterli enerji elde ederler ve daha fazla iyonizasyona neden olurlar. Böylece elektrotlar arasında plazma oluşur. Elektrota RF potansiyeli uygulandığında, hedef malzeme üzerinde alternatif pozitif/negatif gerilim görülür. Elektronlar, yüzeye ulaşarak hedef malzeme üzerinde yük artışını engellemiş olurlar. Sputtering kaplama için kullanılan RF frekansı, 0.5-30 MHz aralığında değişmektedir. RF sputtering düşük gaz basınçlarında yapılabilir (Nalçacıgil, 2011).

Saçtırma hızı düşük olmasına rağmen RF saçtırma elektriksel olarak yalıtkan hedef malzemeler için kullanılır. RF saçtırma yönteminin en büyük dezavantajı, elektriksel olarak yalıtkan malzemelerin birçoğunun, düşük termal iletkenliğe, yüksek termal genişleme katsayısına sahip olması ve çoğunlukla kolay kırılır malzemeler olmasıdır. Bombardıman enerjisi ısı ürettiği için, geniş termal gradyentleri üretilebilir. Bu da eğer yüksek güç seviyesi kullanılırsa, hedef malzemenin kırılmasına yol açar. Yüksek hızda RF saçtırma çoğunlukla silisyum dioksit (SiO_2) hedef malzemeyle sınırlandırılmıştır. Çünkü bu malzeme düşük termal genişleme katsayısına sahiptir ve böylece termal şoka karşı fazla hassas değildir. Bazı durumlarda, birkaç mikron kalınlığında SiO_2 'lik film kaplamak için 48 saat uygulanır (Mattox, 1998). Kullanılan sputter cihazı Şekil 3.10' da verilmiştir. Bu tez çalışmasında, TiNi ve TiNiCu ince filmleri 200 W'da 3 saat sürede elde edilmiştir.



Şekil 3.10. Sputter cihazı

4. ARAŞTIRMA BULGULARI

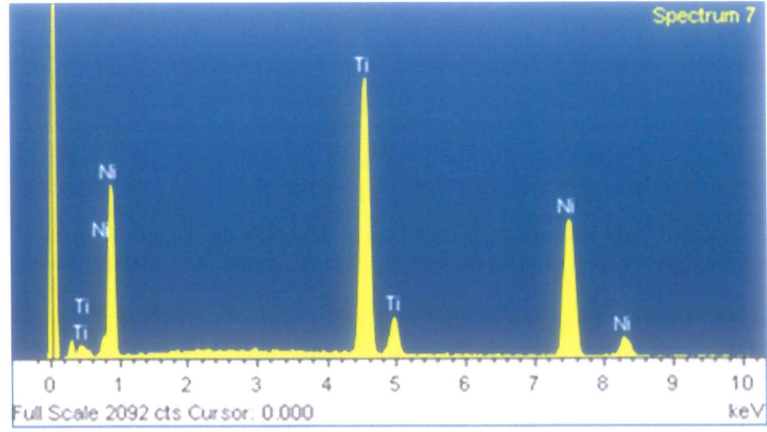
4.1. Yapısal Analiz Ölçümleri

Bu tez çalışması kapsamında, RF magnetron sputter yöntemiyle üretilen Ti-Ni ve Ti-Ni-Cu ince filmlerin yapısal özelliklerinin belirlenmesinde x-ışınları kırınımı ve element bileşenlerinin belirlenmesinde enerji dağılımlı x-ışınları spektroskopisi (EDS) yöntemi kullanılmıştır.

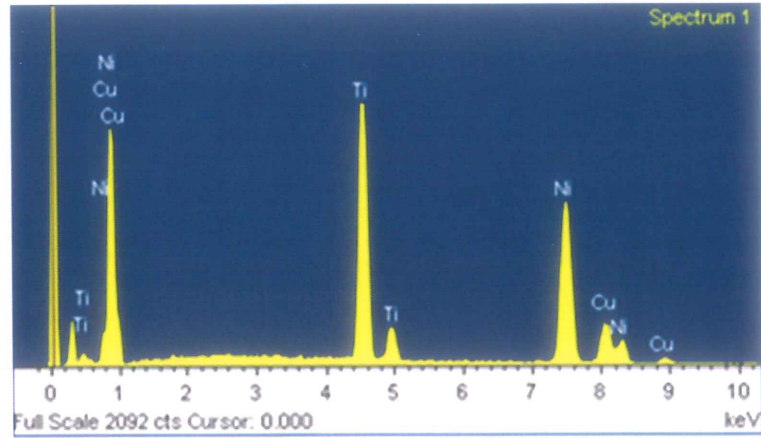
X-ışınları kırınım verileri kullanılarak alaşımların kristal yapıları tanımlanmıştır. Alaşımların içerdiği element miktarını belirlemek için enerji dağılımlı x-ışınları spektroskopisi ölçümleri yapılmıştır. Hassas ve güvenilir bir sonuç elde etmek için alan taramalı modda alaşım üzerindeki birkaç bölge üzerinden yapılmıştır.

4.1.1 Enerji dağılımlı x-ışınları spektroskopisi (EDS) analizi

RF magnetron sputter yöntemi ile elde edilen Ti-Ni ve Ti-Ni-Cu ince filmlerinin atomik kompozisyonları EDS ile belirlenmiştir. Numuneler üzerinde farklı bölgeler seçilmiş ve bu bölgelerden elde edilen değerlerin ortalaması alınarak numunelerin kompozisyonları açığa çıkarılmıştır. Elde edilen sonuçlar Şekil 4.1. ve Şekil 4.2.' de gösterilen spektrumlarla ve Çizelge 4.1' de verilmiştir. EDS sonuçları incelendiğinde hedeflenen Ti-Ni ve Ti-Ni-Cu ince filmlerinin rf magnetron yöntemi ile başarı ile üretildiğini göstermektedir. İnce filmlerde herhangi bir safsızlık elementine rastlanmamıştır.



Şekil 4.1. Ti-Ni ince filmine ait EDS spektrumu



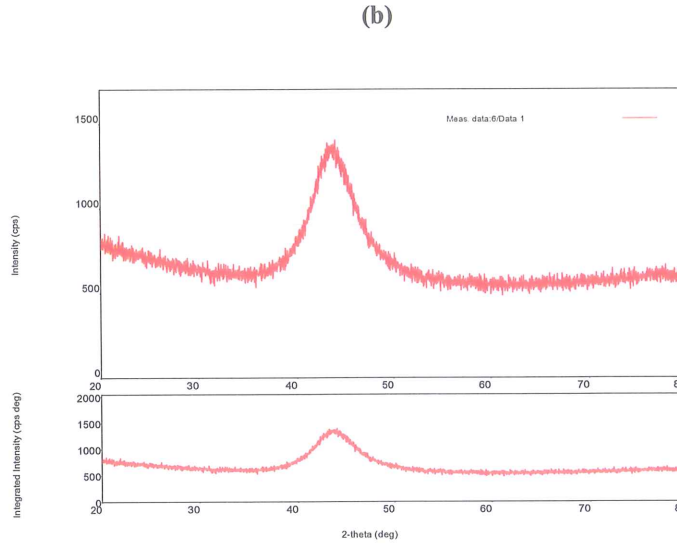
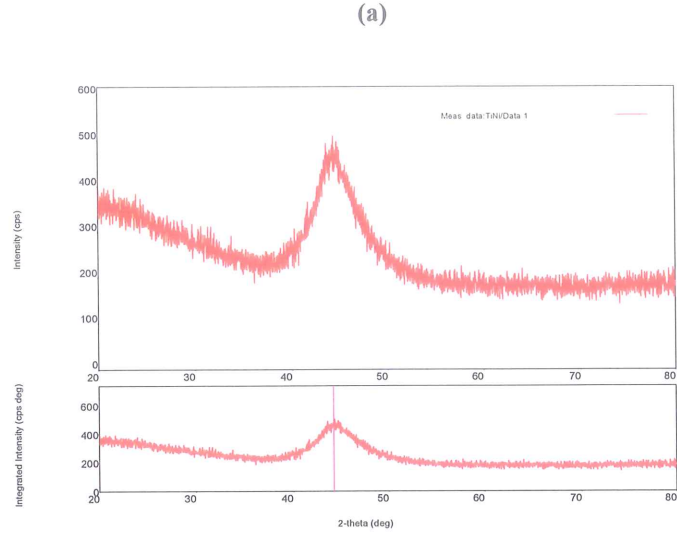
Şekil 4.2. Ti-Ni-Cu ince filmine ait EDS spektrumu

Çizelge 4.1. Ti-Ni ve Ti-Ni-Cu ince filmlerinin atomik kompozisyonu

Atomik (%)	Ti	Ni	Cu
Numune 1	41,2	58,8	-
Numune 2	39,2	52,5	8,3

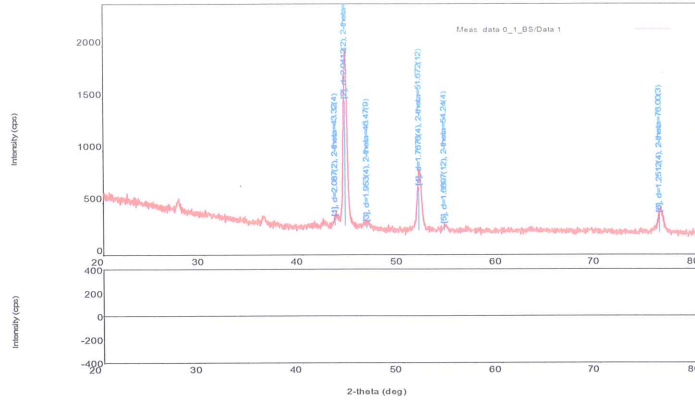
4.1.2. X-Işınları Kırınım (XRD) Analizi

Kompozisyonu belirlenen ince film örneklerine ısıtma işlemi yapılmadan önce XRD deneyleri yapılarak her iki örneğinde ısıtma işlemi görmeden önceki yapılarının amorf olduğu tespit edilmiştir. RF magnetron-sputter işlemi gerçekleştirirken alt taşı sıcaklığı oda sıcaklığı olarak seçilmiş ve alt taşı üzerine biriken atomik yığınların kristalleşme durumu ortaya çıkmamıştır. Ti-Ni ve Ti-Ni-Cu ince filmlerinin ısıtma işlemi görmeden önceki amorf yapısı Şekil 4.3’ de gösterilen XRD sonuçları ile ortaya konulmaktadır. Daha sonra örnekler 500 °C’ de 1 saat, 2 saat, 3 saat ısıtma işlemi uygulanmış ve ince filmler homojenize edilerek kristal hale getirilmiştir. Bu örnekler için XRD deneyleri yapılmış ve sonuçlar Ni-Ti ince filmi için Şekil 4.4 ve Ni-Ti-Cu ince filmi için ise Şekil 4.5’ de verilmiştir. Elde edilen veriler incelendiğinde ısıtma öncesi amorf yapıda olan ince filmlerin ısıtma işlemi sonrasında B2 austenite ve B19 martensite kristal yapıya sahip olduğu görülmüştür. Ayrıca, daha önce bahsedilen Ni-Ti ikili faz diyagramında incelendiğinde ince filmler içerisinde intermetalik Ni-Ti oluşumu gözlenir. Isıtma süresinin artmasına bağlı olarak ince filmlerde yapı içerisinde dağılmış $TiNi_3$ ve Ti_3Ni_4 çökeltilerinin varlığı XRD desenlerinden anlaşılmaktadır. Ti_3Ni_4 çökeltisi malzemenin çift yönlü şekil hafıza özelliği olduğunu gösterir.

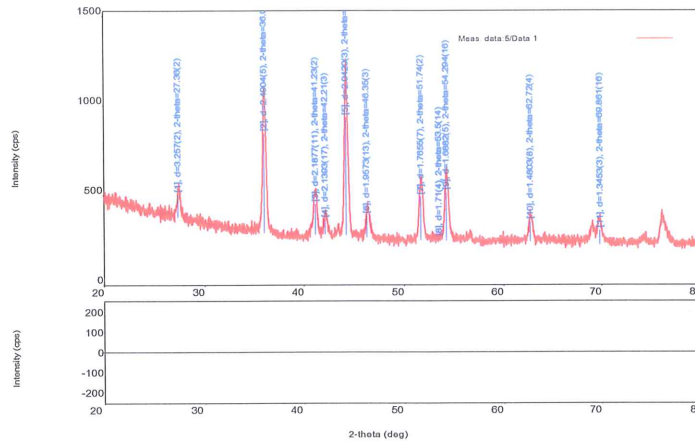


Şekil 4.3. (a) Ti-Ni ve (b) Ti-Ni-Cu ince filmlerinin ısı işlem görmeden önceki XRD desenleri

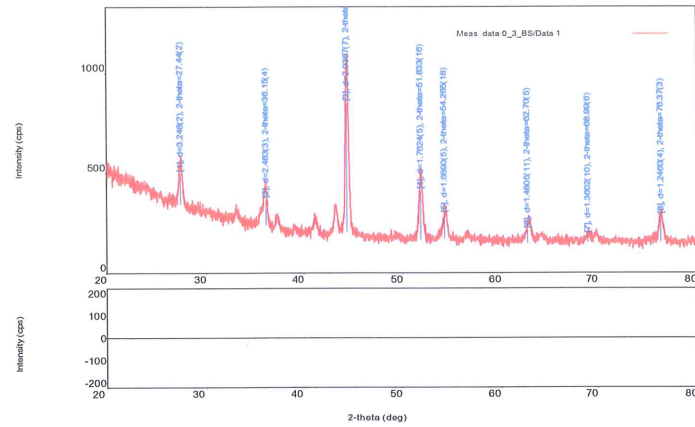
(a)



(b)



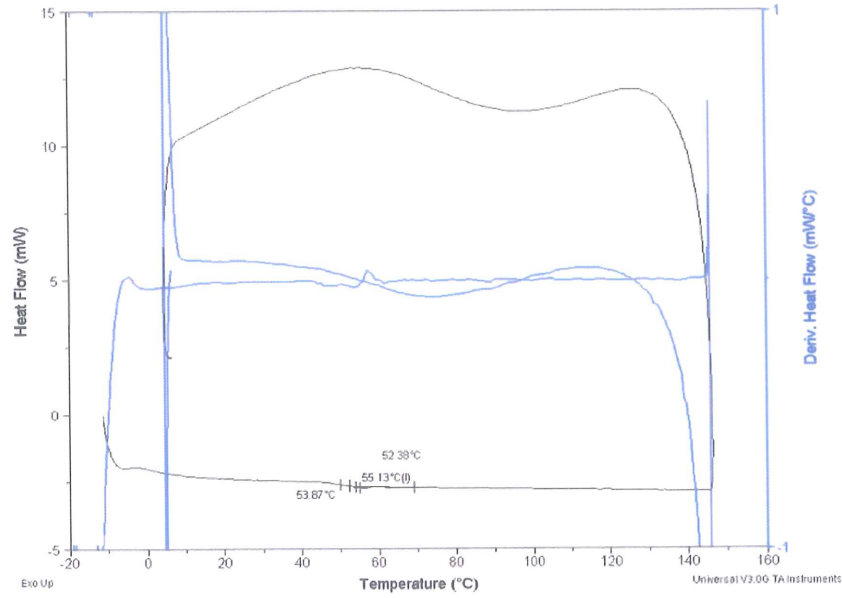
(c)



Şekil 4.4. (a) 1 saat ısıtım işlem gören Ti-Ni, (b) 2 saat ısıtım işlem gören Ti-Ni, (c) 3 saat ısıtım işlem gören Ti-Ni ince filmlerin XRD desenleri

4.1.3. Diferansiyel taramalı kalorimetri (DSC) analizi

Ni-Ti-Cu ince filmlerinin martensitik dönüşüm sıcaklığını belirlemek için DSC ölçümleri yapılmıştır. DSC ölçümlerinin yapılabilmesi için alt taş üzerinden ince filmlerin çıkarılması ihtiyacı doğmuştur. Tüm örnekler için alt taş üzerinden ince filmler çıkarılmaya çalışılmış ancak sadece bir örnekte başarılı olunmuştur. Alt taş üzerinden çıkarılan 3 saat ısıtma işlemi gören Ti-Ni-Cu ince filminin DSC eğrisi Şekil 4.6' da verilmiştir. İncelenen örnek -10°C ' den 150°C ' ye kadar ısıtılmış ve sonra tekrar soğutulmuştur. Isıtma soğutma sırasında martensitik fazın başladığı ve bittiği sıcaklıklar belirlenmiştir. Buna göre martensitik dönüşüm 55°C ' de başlamış ve 53°C ' de bitmiştir.



Şekil 4.6. 500°C ' de 3 saat ısıtma işlemi gören Ti-Ni-Cu ince filminin DSC eğrisi

5. SONUÇ VE TARTIŞMA

Bazı malzemelerin şeklini hatırlayabilmesi için dışarıdan ya termal bir etki ya magnetik bir etki ya da elektriksel bir etki uygulamak gerektiği bilinmektedir. Ti-Ni alaşımları ve ince filmleri termal etki ile şeklini hatırlayan bir özellik göstermektedir. Bu tez kapsamında Ti-Ni-Cu hedef kullanılarak rf magnetron sputtering yöntemi ile elde edilen ince filmlerin şekil hatırlama özeliği araştırılmıştır.

Isıl işlem görmeden önceki ince filmlerin amorf yapıda olduğu ve 500 °C' de 1 saat, 2 saat, 3 saat ısıtım işlem görmüş ince filmlerin ise B2 austenite faz ile birlikte B19 martensite faza sahip olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Isıl işlem süresinin artışına bağlı olarak alaşımlar içerisinde dağılmış TiNi₃ ve Ti₃Ni₄ çökeltilerinin varlığı ve ısıtım işlem süresinin artırılması ile bu çökelti fazının miktarının arttığı bu çalışmanın başka bir sonucudur. Literatürle uyumlu olarak elde edilen bu sonuçlar Ti₃Ni₄ çökeltisinin varlığının alaşımların çift yönlü şekil hafıza özeliği gösterebileceğinin bir kanıtıdır.

Ti-Ni-Cu alaşımı için dönüşüm sıcaklığı literatürde bulunan Ti-Ni ince filmlerinin dönüşüm sıcaklığı ile karşılaştırıldığında ise bu dönüşüm sıcaklığının yaklaşık on derece kadar daha oda sıcaklığına yaklaştığı belirlenmiştir. Bu elde edilen sonuç Ti-Ni-Cu ince filmi için direk termal etki yerine malzemenin elektrik akımı geçirerek malzemenin doğal olarak ısınıp şekil hatırlama özeliği göstereceği sonucuna götürmüştür.

KAYNAKLAR

- Akdoğan, A. ve Nurseven, K. (2003) *Şekil Hafızalı Alaşımlar*, Mühendis ve Makine, 521: 34-39s.
- Arciniegas, D.B. ve Rabins, P.V., (2007) *Pathophysiology of involuntary emotional expression disorder*, 17-22s.
- Aydoğan, Ö. (2009) *Elektron Demeti Buharlaştırma Yöntemi İle Üretilmiş NiTi İnce Filmlerin Faz Yapılarının ve Optik Özelliklerinin Belirlenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 95s.
- Bellouard, Y. (2008) *Shape memory alloys for microsystems: A review from a material research perspective*, Materials Science and Engineering, A: 481-482s, 582-589s.
- Bülent, Y. (1999) *Magnezit cevherlerinin kalsinasyon mekanizması ve kinetik modellenmesi*, Doktora Tezi, Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 137s.
- Callister, W. D. (2003) *Materials Science and Engineering: An Introduction*, John Wiley and Sons Inc., Hoboken NJ, 928s.
- Cansever, N. (2001) *Manyetik Alanda Parçacık Sıçratma Yönteminde Son Gelişmeler*, Mühendis ve Makine, 496s.
- Copp, A.N. (1986) *Thermogravimetric analysis*, American Ceramic Society Bulletin.
- Demirel, S., (2014) *Reaktif RF Magnetron Kopartma Yöntemi Kullanılarak Hazırlanan WO₃ İnce Filmlerin Optik, Yapısal ve Elektronik Özelliklerinin İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 60s.
- Dilibal, S., Sönmez, N. ve Dilibal, H. (2003) NiTi şekil bellekli alaşımlar ve teknolojik kullanım alanları, 3. *Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu*, Ankara.
- Dilibal, S. (2005) *Nikel-Titanyum Şekil Bellekli Alaşım Üretimi ve Şekil Bellek Eğitimi*, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, İstanbul, 128s.
- Fu, Y., Du, H., Huang, W., Zhang, S. Ve Hu, M. (2004) *TiNi-based thin film in MEMS applications: a review*, Sensors and Actuators, 112: 395-408s.
- Funakubo, H. (1987) *Shape Memory Alloys*, Gordon and Breach Science Publishers, New York, 276s.

- Garratt-Reed, A.J., and Bell, D.C. (2005) *Energy-dispersive X-ray analysis in the electron microscope*. BIOS Scientific Publishers Ltd.
- Liu, L.H., Yong, H., Warg, L.M. ve Zheng, Y.F. (2002) *Recent development of the SMA industry in China*, Materials Science Forum, Vol: 395s, 293-296s.
- Massalski, T.B., Okamoto, H. ve Subramain, P.R. (1990) *Binary Alloy Phase Diagrams*, ASM Metallurgica, No: 8, Vol: 35 2137s.
- Mattox, D.M., (1998) *Handbook of pyhsical vapor deposition (PVD) procesing*, Noyes Publications, Westwood, New Jersey, U.S.A., 31-33s, 307-308s.
- Morgan, N.B., (2003) *Medical Shape Memory Alloy Application The Market and its Products*, Materials Science and Engineering, A-378, 16-23s.
- Nalçacıgil, Z., (2011) *Perylene Türevi Organik Yarıiletken İnce Filmlerin Optik Özellikleri İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 67s.
- Ohring, M. (1991) *Materials Science Of Thin Films*, Academic Press, Stevens Institute of Technology, USA, 689s.
- Otsuka, K., Sawamura, T. ve Shimizu, K. (1971) *Phys. Stat. Sol.*, 5: 181-192s.
- Otsuka, K.ve Ren, X. (1998) *Recent Developments in the Research of Shape Memory Alloys*, Intermetallics, 7: 511-528s.
- Otsuka, K. ve Kakeshita, T. (2002) *Science and technology of shape-memory alloys: New developments*, MRS Bulletin, February, 91-100s.
- Otsuka, K. ve Ren, X. (2005) *Physical metallurgy of TiNi based shape memory alloys*, Progress in Materials Science, 50: 511-678s.
- Selimbeyoğlu, E. (1992) *Design of shape memory alloy actuators*, Ph. D. Thesis, ODTÜ, Ankara, 129s.
- Tabib-Azar, M., Suatapun, B. ve Huff, M. (1999) *Applications of TiNi Film Shape Memory Alloys in Micro- Opto- Electro- Mechanical Systems*, Sensors and Actuators, 77: 34-38s.
- Telli, Ş.M. (2004) *Manyetik Alanda Sıçratma Yöntemi İle Üretilen NiTi Hafızalı Alaşımların Filmlerin Karakterizasyonu*, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Toptaş, E. ve Akkuş, N. (2007) *Şekil Hafızalı Alaşımlar ve Endüstriyel Uygulamaları*, *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 4: 15-22s.

- Vural, L. ve Erdiñ, D. (2008) *Œekil Hafızalı Alaşımın Üretilmesi ve Mikroyapı İncelenmesi*, DEÜ Mühendislik Fakültesi, Lisans Tezi, İzmir, 82s.
- Yariv, S. (2004) *The role of charcoal on DTA curves of organo-clay complexes: an overview*, Applied Clay Science, 24, 225-236.
- Yıldız, A., Genç, Ö. ve Bektaş, S. (1997) *Enstrümantal analiz yöntemleri*, Hacettepe Üniversitesi Yayınları A-64, Ankara, 275, 279.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Ad Soyad : Kadir Can MERAL
Uyruk : T.C.
Doğum Yeri ve Tarihi : İstanbul – 17/07/1990
Medeni Hali : Bekar
Telefon : 0 555 287 85 51
E-posta : kadircangfb@hotmail.com

Eğitim

Alınan Derece	Aldığı Kurum /Üniversite	Mezuniyet Yılı
Lise	Yahya Kemal Beyatlı Lisesi	2007
Lisans	Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi	2012
Yüksek Lisans	Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi	2017

Meslek

Çalıştığı Kurum	Görevi	Süresi
Özel Elit Genç Özel Öğretim Kursu	Fizik Öğretmeni	2013 -..