

## ŞEKİL HAFIZALI ALAŞIMLARDA MARTENSİTİK FAZ DÖNÜŞÜMÜ VE ŞEKİL HAFIZA MEKANİZMASI

Mehmet KAYA<sup>1</sup>, Ömer ÇAKMAK<sup>1</sup>, Tuğba Yıldız SAYGILI<sup>1</sup>, Kadri Can ATLI<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Adıyaman Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği  
Bölümü, Adıyaman Türkiye

<sup>2</sup>Anadolu Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Eskişehir  
Türkiye

mehmetkaya75@hotmail.com, omrcakmak@outlook.com, tsaygili@adiyaman.edu.tr,  
canatli@gmail.com

### Özet

Dışarıdan uygulanan etkiler karşısında istenilen tepkilerin alınabildiği malzemeler akıllı malzeme olarak adlandırılır. Bunların en önemli sınıfını Şekil Hafızalı Alaşımlar (ŞHA) oluşturur. Uygun termomekanik işlemler gerçekleştirildiğinde önceden sahip olunan şekil ya da büyüklüğü kazanabilen alaşımlara ŞHA denir. ŞHA'da mikroskobik seviyedeki martensitik faz dönüşümleri, makroskobik seviyede şekil değişmesine neden olur. Bu tür alaşımlar, martensit fazda deforme edildikten sonra, üzerlerindeki yük kaldırılıp ve martensit fazdan ana faza (austenite faz) dönüşecek şekilde ısıtıldıklarında tekrar eski şekillerini alırlar. Bu alaşımlar uzay, otomotiv ve medikal gibi alanlarda yaygın şekilde kullanılmaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** Şekil hafızalı alaşımlar, Martensitik faz dönüşümü, Difüzyonsuz faz dönüşümü.

### MARTENSITIC PHASE TRANSFORMATION AND SHAPE MEMORY MECHANISM FOR SHAPE MEMORY ALLOYS

### Abstract

Smart materials are a class of materials which have properties that can be changed by external stimuli. Shape memory alloys (SMAs) are an important class of smart materials, which, upon deformation, can return to their undeformed shape or

geometry upon heating. This shape or geometry change is only possible when appropriate thermomechanical procedures are applied on the SMA. The martensitic phase transformation that takes place microscopically in the SMA leads to a macroscopic shape change. SMAs, once deformed in the low-temperature martensite phase, can recover their undeformed shapes, when they are unloaded and heated to the high-temperature austenite phase. These alloys are used widely in areas such as space, automotive and medical.

**Keywords:** Shape memory alloys, Martensitic phase transformation, Diffusionless phase transformation.

## **1. Giriş**

Bazı metal ve alaşımlar, dışarıdan uygulanan sıcaklık, basınç, ışık ve manyetik gibi etkiler altında belirli özellikler sergilemelerinden dolayı teknolojiye yaygın olarak kullanılmaktadır. Dışarıdan uygulanan etkilere karşı istenilen tepkilerin alınabildiği bu tür malzemeler akıllı malzeme olarak adlandırılmaktadır. Bunlardan bazıları; ŞHA, akıllı (smart) polimerler, kompozitler, pizoelektrik materyaller, termopizoelektrik materyaller, elektrik şiddetli (electrostrictive) seramikler, pizoseramikler, magnetik şiddetli materyaller, çok kristalli ferroelektrik seramikler, elektrolojikal (electrorheological) akıcılar ve bazı tersine çevrilebilir jellerdir. Bunlardan en yaygın kullanılanları ŞHA'dır. ŞHA; medikal endüstri, havacılık endüstrisi ve otomotiv endüstrisi gibi alanlarda birleştirme özelliği, yay ve akıllı malzeme olarak kullanılmaktadır [1-4].

Metal ve alaşımlarda görülen faz dönüşümleri genel olarak difüzyonlu ve difüzyonsuz olmak üzere ikiye ayrılır. Difüzyonsuz faz dönüşümlerine ait ilk gözlemler 1864'de Sorby, 1866'da Tschernoff ve 1878'de Martens tarafından demir esaslı alaşımlarda yapılmıştır. 1895 yılında Osmond, Martens'in tarifine uygun bir gözlem yapmış ve elde ettiği ürün faza Martensit, bunun yüksek sıcaklık fazına Austenit ve bu dönüşüme de Martensitik Faz Dönüşümü adını vermiştir. Metal ve alaşımların içyapılarında meydana gelen değişmelerin anlaşılmasına öncülük eden ve katıhal fiziği ile fiziksel metalurjide büyük bir öneme sahip olan martensitik faz dönüşümü olayı, ilk

olarak Alman fizikçi metalurjist Adolph Martens tarafından demir esaslı alaşımlarda gözlenmiştir. Daha sonraları yapılan çok sayıda araştırma ile büyük bir gelişmeye sahip olan martensitik dönüşümler, demir esaslı alaşımların yanı sıra geniş çapta soy metal bakır esaslı alaşımlarda ve metalik özellik taşımayan bazı maddelerde de gözlenmiştir [2, 5].

Bir malzemenin özellikleri mikro yapısı ile ilgilidir.Şekil hatırlamalı alaşımlarda mikroskobik seviyedeki martensitik faz dönüşümleri, makroskobik seviyede şekil değişmesine neden olmaktadır. Martensitik dönüşüm, austenit faz olarak adlandırılan dönüşüm öncesi kristal yapının, sıcaklık ve uygulanan basıncın ayrı-ayrı veya birlikte etkisiyle martensit yapıya dönüşmesi olayıdır. Birçok metal ve alaşım sisteminde gözlenen ve birinci dereceden yapısal bir faz dönüşümü olan bu dönüşümlerin en önemli özelliği, atomların ilk komşuluklarının dönüşüm sonrasında korunarak difüzyonsuz olarak gerçekleşmesidir. Bu dönüşümler, termoelastik ve termoelastik olmayan martensitik dönüşümler olmak üzere ikiye ayrılır.Şekil hafızalı alaşımlar da basınç ve sıcaklık etkili, termoelastik martensitik dönüşüm karakterdedir [2, 6].Bu çalışma ŞHA'nın temelini oluşturan martensitik faz dönüşümlerini ve şekil hafıza mekanizmasını açıklamayı hedeflemektedir.

## **2. Şekil Hafızalı Alaşımların Tarihçesi**

Şekil Hafıza Etkisinin (ŞHE'nin) keşfi 1930'lara dayanır. A. Ölander 1932'de Au-Cd alaşımının suni elastik davranışını keşfetti. 1938'de Greninger ve Mooradian bir Cu-Zn alaşımın sıcaklığının artması ve azalması ile martensitik fazın oluşmasını ve yok olmasını gözlemledi. 1960'larda Buehler ve arkadaşları (Şekil 1), U.S. Naval Ordnance Laboratuar'ında eşatomlu NiTi alaşımının ŞHE'ni keşfettiler. Bu alaşım Nitinol (Nikel Titanyum Naval Ordnance Laboratuar) adında ticarileştirildi.Alaşımın dikkate değer özellikleri tesadüfen keşfedildi.Alaşım numunelerine çekiçle vurularak darbe testleri uygulanıyordu.Birkaç darbeden sonra araştırmacılar numuneleri pencere kenarına bırakıp öğle yemeğine gittiler ve geri döndükleri zaman, numunelerin kendi kendilerine düzelmiş olduğunu gördüler.[2, 7, 8].1968 yılında NiTi alaşımının değeri Johnson ve Alicandri tarafından implant malzemesi olarak kullanılması ile değeri daha da arttı. NiTi

alaşımının biyomalzeme olarak kullanımı, geleneksel metal alaşımlarında olmayan ısı ŞHE ve superelastiklik özelliklerinden dolayıdır. NiTi alaşımı tıbbi amaçlarla ilk defa 1970'lerde kullanıldı.NiTi alaşımı 1980'lerde dişlerin düzeltilmesi ve deneysel ortopedik uygulamalarda destek amaçlı olmak üzere ve 1990'ların ortasında tıpta stent uygulamalarında kullanıldı [7].



Şekil 1. William J. Buehler, 1968[7].

### 3. Martensitik Faz Dönüşümü

Yapısal faz dönüşümleri difüzyonlu ve difüzyonsuz olmak üzere iki gruba ayrılır. Difüzyonsuz faz dönüşümleri; en genel şekilde, yüksek sıcaklık fazında belirli bir kristal yapıda bulunan numunenin sıcaklık, basınç, gerilme veya bunların farklı kombinezonlarının etkisiyle daha küçük serbest enerjili düşük sıcaklık fazındaki farklı bir kristal yapıyı tercih etmesi şeklinde bilinir. Difüzyon olmadığı için dönüşüm öncesi atomik komşuluklar dönüşümden sonra da aynı kalır. Bu nedenle difüzyonsuz dönüşümler “askeri dönüşümler” olarak adlandırılır. Difüzyonlu dönüşümler ise atomların birlikte hareketini kapsamadığından ve yer değiştirme atomik boyutlardan büyük olabildiğinden dolayı “sivil dönüşümler” olarak adlandırılır [6].

Difüzyonsuz bir faz dönüşümü olan martensitik dönüşüm ilk defa 1876 yılında demir esaslı alaşımlarda görülmesinin yanında yaklaşık 80 yıl sonra şekil hafızalı alaşımlarda da gözlenmiştir. Martensitik dönüşümler atomların birlikte hareketiyle meydana geldiklerinden difüzyonsuz dönüşümlerdir. Martensitik dönüşüm, malzeme yüksek sıcaklık austenit fazından ani soğutulduğunda, bir  $M_s$  sıcaklığında başlar ve martensit bitiş sıcaklığı  $M_f$  de dönüşüm tamamlanır. Eğer sıcaklık arttırılırsa; oluşan

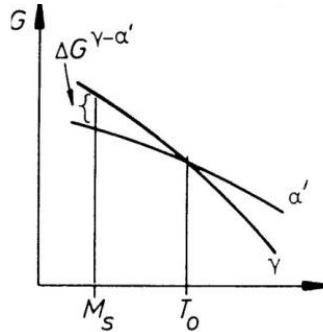
martensit, austenit başlangıç sıcaklığı olan  $A_s$  sıcaklığında austenit faza dönüşmeye başlar ve austenit bitiş sıcaklığı olan  $A_f$  de dönüşüm tamamlanıp tekrar austenit faz elde edilir. Kural olarak tüm metaryaller soğutma ve ısıtma sıcaklığı yeteri kadar hızlı tutulduğunda difüzyonsuz dönüşüme uğrayabilirler. Birçok metalik veya metalik olmayan kristaller, mineraller ve bileşiklerde martensitik dönüşüm meydana gelebilir [5, 6].Martensitik dönüşümlerin genel karakteristikleri şu başlıklar altında özetlenebilir [2, 9-11].

- Martensitik faz, ara bir katı çözüldür.
- Kristaldeki atomların dönüşüm öncesindeki komşulukları dönüşüm sonrasında da korunduğundan dönüşümde difüzyon yoktur.
- Sıcaklığın düşmesi ile plaka şekilli hızlı hacim dönüşümü mevcuttur.
- Dönüşüm sınırlı bir şekil değişikliği ile meydana gelir. Dönüşümün soğuk işlem ile de desteklenmesi mümkündür.
- Ürün faz, ana faz üzerinde belirli düzlemlere yerleşir ve belirli yönelimlere sahiptir. Bu düzleme habit (alaşım) düzlemi denir. Bir martensitik dönüşümde bozulmamış olarak kalan ve ana faz ile ürün fazı ayırtan düzlem, habit (alışkanlık, yerleşme) düzlemi olarak bilinir.
- Dönüşümde kristal örgü kusurları da oluşur.

Şekil 2’de görüldüğü gibi  $T_0$  sıcaklığında bulunan austenit fazın sıcaklığının hızla düşürülmesi ile bir  $M_s$  sıcaklığında martensit plakaları çekirdeklenmeye başlar.  $T_0 - M_s$  farkı, dönüşümü başlatmak için gerekli enerji olan sürücü kuvvetle ilgilidir. Dönüşüm için her iki fazın serbest enerji farkı dışında, yüzey enerjisi ve dönüşüm zorlanma enerjisi gibi ek bir enerjiye ihtiyaç vardır [6].

Martensit plakaları kristal yüzeyinde oluşursa, yüzey kabartıları şeklinde gözlenir. Bu yüzey kabartıları gelişigüzel oluşmamakta ve yüzeydeki çıkıntı eğimleri kristal yönelimine bağlı değerler almaktadır. Bu nedenle; yüzey kabartıları, martensitik dönüşümün mikroskopik olarak gözlenen en önemli özelliklerinden birisidir. Martensitik faz, alaşımın cinsine bağlı olarak; ince plaka, iğne, kama ve benzeri şekillerde gözlenir. Martensit faz; ikizlenmeler, yığılma kusurları, dislokasyonlar gibi örgü kusurları içermektedir[6, 9, 12].

Martensitik dönüşümlerin termoelastik (örneğin Au-Cd) ve termoelastik olmayan (örneğin Fe-Ni) olmak üzere iki tipi vardır. Şekil 3’de Fe-Ni ve Au-Cd alaşımları için sıcaklığa karşı elektrik direnç değişiminin grafiği görülmektedir. Termoelastik martensitik dönüşümlerde dönüşüm histerizesi ( $A_s-M_s$ ) küçük, termoelastik olmayanlarda ise geniş bir dönüşüm histerisi görülmektedir. Dönüşüm histerizesi büyük olduğu zaman dönüşümün gerçekleşmesi için gerekli olan serbet enerji değişimi ve sürücü kuvvet de artmaktadır. Termoelastik olmayan Fe-Ni martensit dönüşümünde yaklaşık 400 °C kadar geniş bir dönüşüm histerize aralığı görülürken termoelastik dönüşüm özelliği sergileyen Au-Cd alaşımında dönüşüm histerize aralığı yaklaşık 15 °C kadar olup daha dardır [13]. Termal etkili martensitik dönüşümler aynı zamanda izotermal ve atermal olmak üzere de iki guruba ayrılır. Şekil hafızalı alaşımlar izotermal martensitik dönüşüm özelliği gösterirler [5, 14]. Bunun yanında şekil hafıza özelliğinin oluşması için ana faz düzenli olmalıdır. Ayrıca dönüşümün gerçekleşmesi için deformasyon, dislokasyon kayması ile değil ikizlenme benzeri bir mekanizma ile meydana gelmelidir [6].



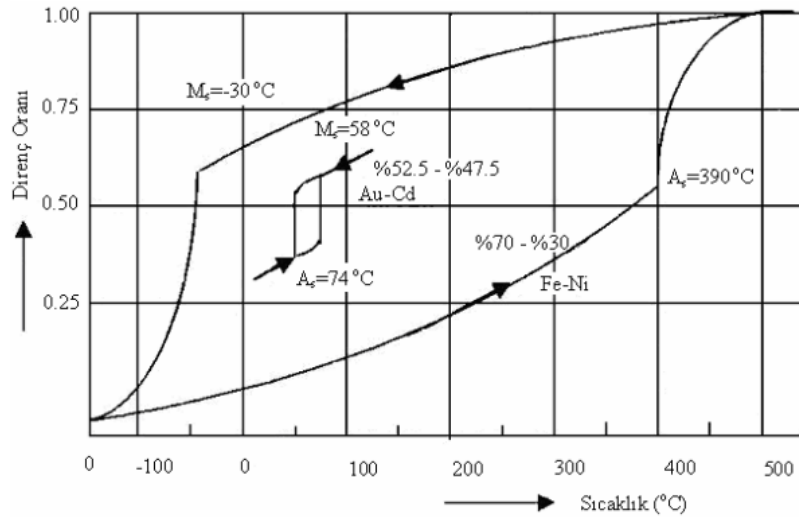
Şekil 2. Martensit ve austenit için serbest enerji sıcaklık diyagramı (G; Serbest enerjili,  $\Delta G$ ; Sürücü kuvvet, T; sıcaklık,  $\gamma$ ; austenit,  $\alpha'$ ; martensit).

İzotermal martensitik dönüşüm, sıcaklığın düşürülmesi sonucu bir kritik sıcaklığa ( $M_s$ ) ulaşıldığı zaman martensit plakaların çekirdeklenmesi ile başlar. Sıcaklığın düşüşüyle birlikte martensit plakaların sayısı artmaya devam eder. Martensit bitiş sıcaklığına ( $M_f$ ) ulaşıldığında dönüşüm tamamlanır. Aynı işlemin tersi olarak, eğer sıcaklık yükseltirse plakalar kaybolmaya başlar.  $T_0$  sıcaklığının üstünde austenit başlama sıcaklığında ( $A_s$ ) bu defa martensit faz içerisinde austenit faz oluşmaya başlar. Austenit bitiş sıcaklığında ( $A_f$ ) dönüşüm tamamlanır.  $A_s$  sıcaklığı ile  $M_f$  sıcaklığı aynı

değerde değildir. Yani austenit-martensit dönüşümler tersinir dönüşümlerdir. İzotermal dönüşümün gerçekleşebilmesi için ortamın sıcaklığının değiştirilmesi ya da dışarıdan bir zor uygulanması gerekmektedir. Şekil hafızalı alaşımlar izotermal martensitik dönüşüm sergilerler. Bazı şekil hafızalı alaşımlarda, sıcaklık dışında basınç ve magnetik alan da martensitik dönüşüme katkıda bulunabilir.

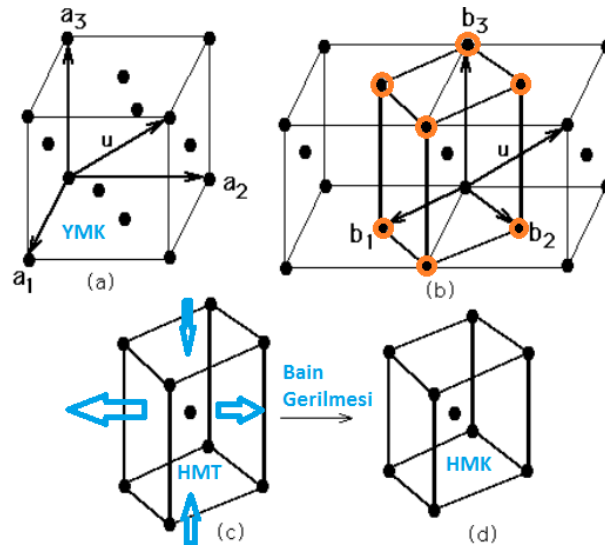
Atermal martensitte, ana (austenit) fazdaki numunenin sıcaklığı  $M_s$  sıcaklığına düşürüldüğünde, dönüşüm, martensit plaka çekirdeklerinin oluşumu ile değil de, ani bir patlama (burst) reaksiyonu ile yapının dönüşümüne uğrayacak kısmının tamamen martensit faza dönüşmesi şeklinde meydana gelir. Alaşımın dönüşecek bütün kısmı bu sıcaklıkta martensit faza dönüşür ve dönüşüm tamamlanır. Bu dönüşüm esnasında şekil hatırlama olayı gözlenmez [15].

Termoelastik olmayan bir dönüşüm için soğutma sırasında bir martensit plakası belli bir büyüklüğe kadar büyür, daha sonra yapılacak soğutma için daha fazla büyüme gerçekleşmez. Büyüme adımı, soğutma sırasında artan sürücü kuvvet ile termodinamik dengede kalma eğilimindedir. Çünkü arayüzey açık bir şekilde sabitlenir. Sabitlenen arayüzey ısıtma sırasında geri hareket etmez. Bunun yerine ana faz, sabitlenen martensit plakalar arasında çekirdeklenir ve bir plakanın tamamı orijinal ana faz yönelimine geri dönemez [15-17].



Şekil 3. FeNi (termoelastik olmayan) ve AuCd (termoelastik olan) alaşımlarında martensit dönüşümlerinin histerize eğrileri [13].

Difüzyonsuz bir faz dönüşümü olan martensitik dönüşümün kristolografisi ilk defa Bain tarafından Fe-esaslı alaşımlar için tanımlanmıştır. Bain; yüzey merkezli (ymk) iki birim hücreden bazı atomların küçük yerdeğiştirmeleri sonucu austenit yapıdan hacim merkezli tetragonal (hmt) yapının oluştuğunu belirtmiştir (Şekil 4). Fe-asalı alaşımlarda yüzey merkezli kübik (ymk) austenit yapıdan hacim merkezli tetragonal (hmt) martensit yapı oluşurken diğer alaşımlardan farklı kristal yapıya sahip martensit yapılar oluşabilmektedir [18, 19].



Şekil 4. Bain tarafında modellenen ymk-hmt-hmk kristal yapı dönüşümünün mekanizması.

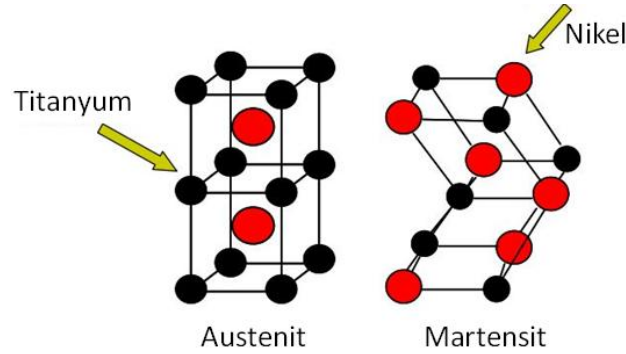
#### 4. Şekil Hafıza Mekanizması

Alaşımlardaki şekil hafıza etkisi, alaşımların izotermal türü termoelastik martensitik dönüşüm özelliği göstermelerinden ve deformasyonun kayma ile değil, ikizlenme ile olmasından kaynaklanmaktadır. Şekil 5’de, austenit-martensit dönüşümün birim hücre türünden değişimi, mikro mekanizması (Şekil 6) ve makroyapı değişimi (Şekil 7) şematik olarak gösterilmektedir. Düzenli ana austenit fazı  $M_s$  sıcaklığının aşağısına kadar soğutulduğu zaman martensit faz oluşur. Bu durumda, dönüşüme ikizlenme ve benzeri deformasyonlar eşlik etmelerinden dolayı makro şekil değişimi olmaz. Martensit,  $M_f$  sıcaklığının aşağısında bir dış gerilmeye uğradığı zaman ikizlenme

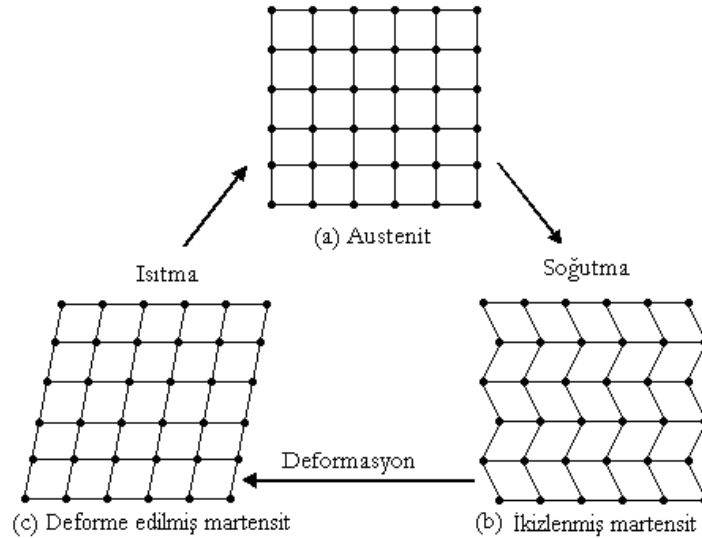


sınırları hareket eder ve kaybolur. Deforme edilmiş martensit, ısıtıldığı zaman martensitten ana austenit faza ters dönüşüm gerçekleşir ve böylece, ana orijinal şekil tekrar elde edilir [2, 4, 20].

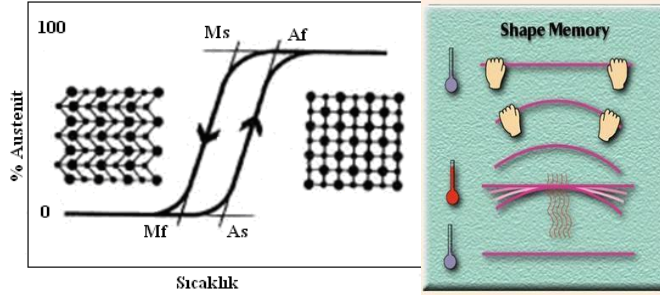
Numunelerin ısıtılması ve soğutulması ile dönüşüm sıcaklıklarının belirlenmesi için diferansiyel tarama kalorimetresi (DSC) tekniği kullanılır. Şekil 8’da bir NiMnGa alaşımı için farklı termal çevrimlerden sonra DSC eğrileri gösterilmektedir [21]. Şekilde gösterildiği gibi ısıtma sırasında DSC eğrisi üzerinde belirgin bir endotermik pik vardır. Bu pik, tetragonal martensitten kübik austenite ters martensitik dönüşüm ile ilgilidir. Burada  $A_s$  sıcaklığında ( $262,5^{\circ}\text{C}$ ) austenit dönüşüm başlar ve  $A_f$  sıcaklığında ( $287,8^{\circ}\text{C}$ ) tamamlanır. Soğutma sırasında austenitten martensite ilk martensitik dönüşüm gerçekleşir. Bu durum, bir egzotermik pik ile DSC eğrisi üzerinde gösterilmektedir. Dönüşüm martensit başlama sıcaklığı  $M_s$  ( $260,2^{\circ}\text{C}$ ) ile başlar ve martensit bitiş sıcaklığı  $M_f$  ( $237,8^{\circ}\text{C}$ ) ile tamamlanır.



Şekil 5. Austenit ve Martensit yapılarının birim hücre görünümü.

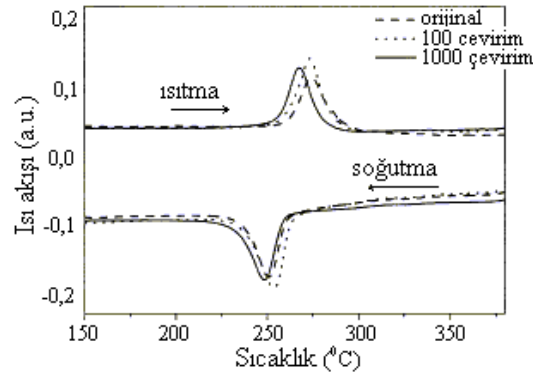


Şekil 6. Isıtma-soğutma ve deformasyon ile austenit ve martensit dönüşümünün mikroyapı mekanizması.



Şekil 7. Şekil Hafıza Mekanizmasının mikro ve makro yapı görünümü.

Şekil 9.a'da gösterildiği gibi bazı şekil hafızalı alaşımlar (ŞHA), martensit fazda ( $T < M_f$  sıcaklığında) deformasyona uğratıldıkları zaman şekilleri değişir ve deforme amacıyla uygulanan basıncın kaldırılması sonucu numune kendi orijinal şekline geri dönmeyebilir. Isıtma sonucu kritik bir sıcaklığın ( $T > A_f$ ) üzerinde basınç kalkarak numune orijinal şekline geri döner. Sıcaklık tekrar düşürüldüğünde, numune deforme edilmiş şeklini tekrar kazanamaz. Alaşımların bu tür özelliklerine tek yönlü şekil hafıza olayı denir. Tek yönlü şekil hafıza olayı NiTi, TiNb, NiAl, CuZn, CuZnSi, CuZnSn, FePt ve FeMnC gibi birçok alaşım sisteminde görülmektedir.

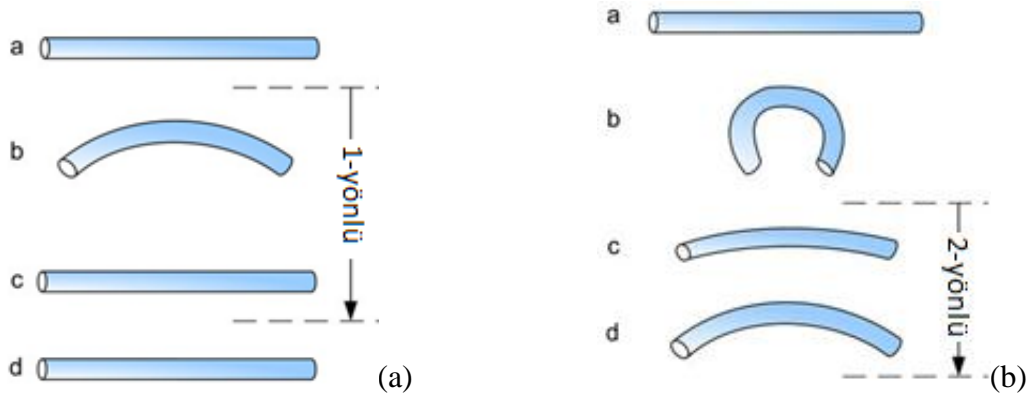


Şekil 8. Farklı termal çevrimlerden sonra  $Ni_{24}Mn_{25}Ga_{21}$  alaşımının DSC eğrileri[19].

## 5. Şekil Hafızalı Alaşım Türleri

1. Tek Yönlü Şekil Hafızalı Alaşımlar
2. Çift Yönlü Şekil Hafızalı Alaşımlar
3. Suni Elastiklik

Bazı alaşımlarda ise sadece sıcaklığın fonksiyonu olarak ısıtma ve soğutma ile şeklini değiştirebilen çift yönlü şekil hafıza olayı görünür (Şekil 9.b). Numune martensit fazda deforme edildiği zaman tek yönlü şekil hafızada olduğu gibi şekli değişir. Numune ısıtıldığı zaman austenit faza geçer ve orijinal şeklini alır. Eğer numune tekrar soğutulursa yapı martensit faza geçer ve numune tekrar deforme edilmiş şeklini alır. ŞHA'nın bu tür özelliğine çift yönlü şekil hafıza olayı denir [2, 22, 23].



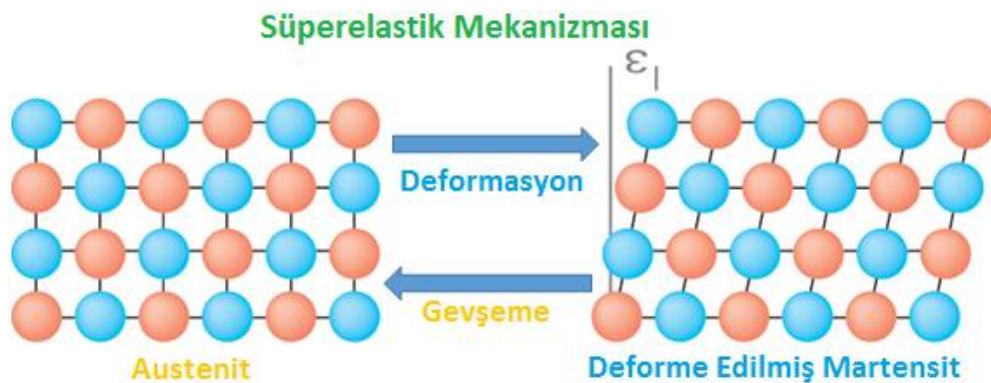
Şekil 9.(a) Tek yönlü şekil hafızalı alaşım, (b) İki yönlü şekil hafızalı alaşım.

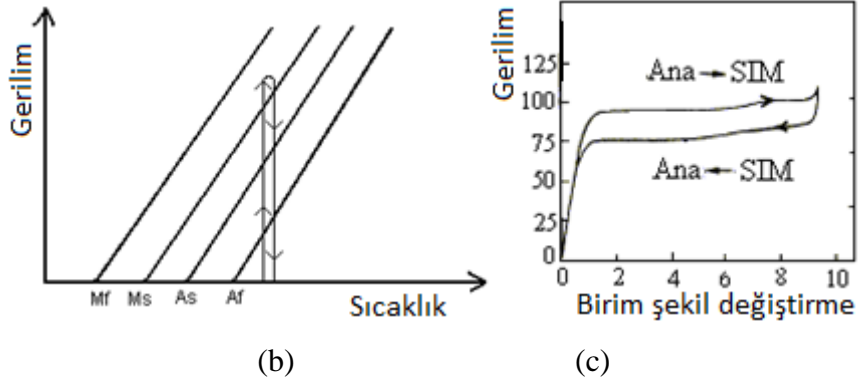
Çift-yönlü ŞHE iki farklı termomekanik eğitimle elde edilebilir. Birinci eğitimde, numuneler  $M_f$  sıcaklığı aşağısında soğutulur ve istenen şekilde bükülür. Sonra  $A_f$  üzerindeki bir sıcaklığa ısıtılır ve austenit şeklini alması için serbest bırakılır. Bu işlem 20-30 defa tekrarlanır. Böylece numune eğitilmiş olur. Bundan sonra numune  $M_f$  sıcaklığı altına soğutmayla programlanmış şeklini alır ve  $A_f$  sıcaklığı üzerine ısıtmayla bir diğer şeklini alır. İkinci eğitimde ise, numune, gerilim-etkili martensitin tercihli varyantlarını üretmek için tam  $M_s$  sıcaklığı üzerinde deforme edilir. Sonra  $A_f$  sıcaklığı üzerinde ısıtmayla numune original şeklini alır. Bu işlem 20-30 defa tekrarlanır. Eğitim aynı zamanda dönüşüm sıcaklığında, histerize genişliğinde değişmeye ve makroskobik dönüşüm zorlanmasında azalmaya neden olur. Eğitim için optimal şartları belirlemek zordur. Çünkü eğitim çevriminin sayısı yetersiz ise iki yönlü "kararsız" ŞHE oluşur. Aşırı eğitim, eğitimin verimini azaltan istenmeyen etkiler oluşturur [7, 24-26].

ŞHA martensit dönüşümlere bağlı olarak süperelastiklik veya suni elastiklik özellikleri de sergilerler. Belirli bir yüksek sıcaklıkta (austenit fazda) ŞHA, dışarıdan uygulanan bir yük altında geniş bir deformasyon sergileyebilirler

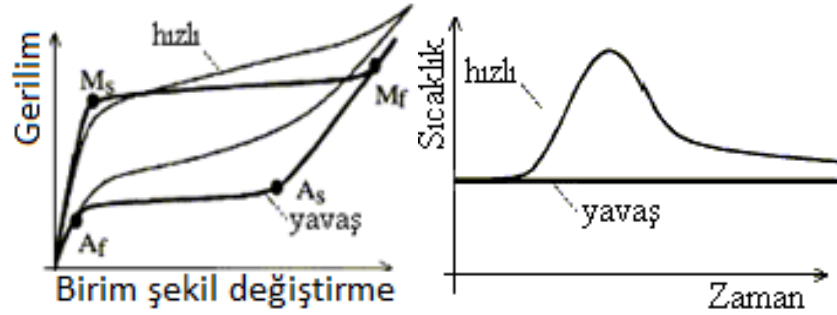
[20].Deformasyonun bu geniş miktarı yük boşaltıldıktan sonra elastik olarak tamamen ortadan kalkabilir.Süperelastik denilen bu olay yükleme-boşaltma (loading-unloading) işlemleri sırasında austenit-martensit ve martensit-austenit ters dönüşümleri ile gerçekleşir[27, 28].Süperelastik dönüşümün mekanizması şematik olarak Şekil 10.a ve Şekil 10.b’de gösterilmektedir [29].Dönüşümün gerilim-birim şekil değiştirme eğrisi ise Şekil 10.c’deki gibi gösterilebilir. Üst plato gerilim altındaki martensit oluşumuna karşılık gelirken, alt plato gerilim kaldırıldığı zaman basınç-etkili martensit oluşumunun tersini gösterir[21].Şekil 11’de ise şekil hafıza etkisi ve süperelastiklik etkisinin meydana geldiği gerilme ve sıcaklık alanları gösterilmektedir.ŞHA, süperelastik deformasyon davranışı özelliğinden faydalanılarak birçok alanda akıllı ve fonksiyonel yapılar geliştirmek için kullanılmaktadır.Özellikle, biyomedikal mühendislik alanlarında kullanılmaktadır. Örneğin; süperelastik NiTi damarlar, kan damarları takviye etmek için kullanılmaktadır [29, 30].

Martensitik dönüşüme duyarlı bir alaşıma, ters dönüşümün zor uygulanmadan tamamlandığı bir sıcaklıkta ( $T > A_f$ ) zor uygulanırsa Şekil 10.c’deki gibi gerilim-birim şekil değiştirme eğrisi elde edilir. Basınç (gerilim) etkisiyle  $M_s$  de martensit plakaları oluşmaya başlar ve basınç uygulandığı sürece devam eder. Kopma meydana gelinceye kadar alaşım plastik olarak deforme olur. Eğer uygulanan basınç kaldırılırsa ters dönüşüm başlar ve martensit kesri ana faz elde edilinceye kadar azalarak tamamen ana faza dönüşür. Gerilim varken ve kaldırıldığında elde edilen eğrinin kapattığı bölge, kaybolan enerji miktarını belirler.Bu tür dönüşüm, suniesneklik olarak adlandırılır [5, 31].Şekil 11’de gerilim-birim şekil değiştirme eğrisi üzerinde dönüşüm noktaları gösterilmektedir.





Şekil 10.Süperelastik mekanizmasının şematik gösterimi (a,b) [29].(c) Süperelastik davranışın gerilim-birim şekil değiştirme eğrisi [20].



Şekil 11.Faz dönüşümlerinin başlama ve bitişinin belirtisi ile izotermal ve izotermal olmayan sunielastiğin şematığı. A→M ( $M_s$ ,  $M_f$  noktaları) ve M→A ( $A_s$ ,  $A_f$  noktaları)[31].

## 6. Sonuçlar

Akıllı malzemelerin bir sınıfını oluşturan ŞHA'nın özellikleri mikroyapılarından gerçekleşen faz dönüşümlerinden kaynaklanmaktadır. Metal ve alaşımlarda görülen yapısal faz dönüşümleri difüzyonlu ve difüzyonsuz olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır. Difüzyonsuz bir faz dönüşümü olan martensitik dönüşümler ŞHA'nın özelliklerinin sergilenmesinde temel bir olay olup dönüşüm çeliklerdeki gibi kayma ile değil ikizlenme mekanizması ile gerçekleşmektedir. ŞHA'da görülen martensitik yapı ikizlenme ile gerçekleştiğinden dolayı çeliklerdekinin aksine austenit yapıya göre sert değil yumuşaktır. Bu alaşımlar uzay, otomotiv ve medikal endüstrisi gibi alanlarda yaygın şekilde kullanılmakta ve halen araştırmacıların yoğun ilgisini çekmektedir.

### **Kaynaklar**

- [1] Mckelvey A.L. and Ritchie R.O., Fatigue-crack growth behavior in the superelastic andshape-memory alloy Nitinol, Metallurgical and Materials Transactions A, 2001; 32A: 731-743.
- [2] Kaya, M., Toz metalürjisi ile üretilen şekil hatırlamalı alaşımların metalürjik ve mekanik karakteristiklerinin incelenmesi, Doktora tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 2008.
- [3] Nurveren, K., Demir esaslı şekil hafızalı alaşımlar, Niğde Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 2013, 2, 1, 10-16.
- [4] Nurveren, K., NiTi alaşımlarında şekil hafıza etkisinin iyileştirilmesi, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul-2008.
- [5] Kayalı, N., Cu-Zn-Al alaşımlarında martensit stabilizasyonu ve yaşlandırma etkileri, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ. 1993.
- [6] Porter, D.A. and Easterling, K.E., Phase transformations in metals and alloys, 1 Second Edition, Chapman & Hall, T.J. Press (Padstow) Ltd., UK. 1992.
- [7] Ryhanen, J., Bicompatibility evaluation of nichel titanium shape memory metal alloy, PhD. Thesis, Oulu University Library, 1999.
- [8] Schiller, E.H., Heat engine driven by shape memory alloys: Prototyping and Design, Thesis submitted to the Faculty of Virginia Polytechnic Institute and State University in partial fulfillment of the requirements for a degree of Master of Science in Mechanical Engineering, 2002.
- [9] Kazanç, S., Zor etkili difüzyonsuz faz dönüşümlerinin bilgisayar benzetimi ile incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ. 2000.
- [10] Otsuka, K. Wayman, C.M., Shape memory materials, Cambridge University Press, 1998.
- [11] Otsuka, K., Ren, X., Recent developments in the research of shape memory alloys, Review, Intermetallics 1999, 7, 511-528.

- [12] Eskil, M., Seval, E., Akis, A.Ç., Şekil Hatırlamalı CoNiAl alaşımlarının kristalografik özellikleri, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 2014, 3019-28.
- [13] Khaled Mohamed Mostafa, A study of iron based alloys by positron annihilation spectroscopy, PhD Thesis, Ghent University, Mei 2009.
- [14] Çakmak, S., Bakır bazlı alaşımlarda martensit varyantların grup kombinasyonları, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 1992.
- [15] Nishiyama, Z., Martensitic transformation, Academic Press, NEW YORK, 1978.
- [16] Eskil, M., Şekil hatırlamalı CuZnAl alaşımlarında soğutma hızı etkileri ve çökelti kinetikleri, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 2000.
- [17] Durkaya, F., Fe-%18,97Mn-%1,92V alaşımında martensitik dönüşümler ve şekil hatırlama özelliğinin termal ve mekanik etkiler altında incelenmesi, Doktora Tezi, Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kırıkkale-2010.
- [18] Olson G.B. and Owen W.S., Martensite, ASM international, The materials information society, USA 1992.
- [19] Kauffmann-Weiss, S., Kauffmann, A., Niemann, R., Freudenberger, J., Schultz, L., and Fahler, S., Twinning phenomena along and beyond the Bain Path, Metals, 2013; 4: 319-336.
- [20] Yang, C.C. and Nakae, H., Foaming characteristics control during production of aluminum alloy foam, Journal of Alloys and Compounds, 2000; 313: 188-191.
- [21] Ma, Y.Q., Jiang, C.B., Feng, G. and Xu, H.B., Thermal stability of the Ni<sub>54</sub>Mn<sub>25</sub>Ga<sub>21</sub>Heusler alloy with high temperature transformation, Scripta Materialia, 2003; 48: 365-369.
- [22] Çakır, A., Investigation of magneto-structural phase transitions in magnetic shape memory alloys, PhD Thesis, Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Muğla-2014.
- [23] Gümüş, B., Computational and experimental investigation of the critical role of twinning on the plastic deformation of high-manganese austenitic steels and

pseudoelasticity of NiTi shape memory alloys, PhD Thesis, Koç University Graduate School of Sciences and Engineering, İstanbul-2015.

- [24] Dimitris C.L, Pavlin B.E, Modeling of transformation-induced plasticity and its effect on the behavior of porous shape memory alloys, *Mechanics of Materials* 2004; 36: 865–892.
- [25] Liu, Yinong, Liu, Yong and Humbeeck, Jan Van, Two-way shape memory effect developed by martensite deformation in NiTi, *Acta mater*, 1999; 47-1: 199-209.
- [26] Simon, A.A., Shape memory response and microstructural evolution of a severe plastically deformed high temperature shape memory alloy (NiTiHf), Submitted to the Office of Graduate Studies of Texas A&M University in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science, 2004.
- [27] Auricchio, F., and Sacco, E., Thermo-mechanical modelling of a superelastic shape-memory wire under cyclic stretching-bending loadings, *International Journal of Solids and Structures*, 2001; 38: 6123-6145.
- [28] Slutsker, J., and Roytburd, A.L., Control of intrinsic instability of superelastic deformation, *International Journal of Plasticity*, 2002; 18: 1561-1581.
- [29] Yan, W., Wang, C.H., Zhang, X.P. and Mai, Y-W., Theoretical modelling of the effect of plasticity on reverse transformation in superelastic shape memory alloys, *Materials Science and Engineering*, 2003; A354: 146-157.
- [30] Dikici, B., Toz metalürjisi yöntemiyle nikel titanyum alaşımlarının üretimi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul 2010.
- [31] Bernardini, D. and Vestroni, F., Non-isothermal oscillations of pseudoelastic devices, *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 2003; 38: 1297-1313.