



ŞEKİL BELLEKLİ ALAŞIMLAR

Agah AYGAHOĞLU*

ÖZET

Şekil bellekli bütün malzemeler deformasyona (eğme, kıvrıma, vb) uğratıldıktan sonra ısıtma sonucu eski şeklini hatırlayarak deformasyondan önceki haline geri döner. Bunun sebebi şekil bellekli alaşımların martenzitik yapıya sahip olmasıdır; Martenzitik durumda deformasyona uğratılan şekil bellekli alaşım ısıtma sonucu yüksek sıcaklık fazı ostenite dönüşerek deformasyondan önceki haline geri döner.

Anahtar Kelimeler: Martenzit, Şekil Bellek Etkisi, Termoelastik Martenzit, Elektron - Atom Oranı.

1. GİRİŞ

Tunç devrinden beri insanlar, metalin bükme, kalıplama, dövme ve ısıtma ile şeklinin değiştirilmesine olanak sağlayan üstün özelliklerinden yararlandılar. Şimdi metalurjistler bir adım daha ileri giderek, bir çok alanda yenilikler yaratabilecek şekil belleğine sahip metalik alaşımlar elde ettiler. Bu alaşımlar, yalnızca sıcaklıkta ki bir değişim sonucu, birbirini izleyen tümüyle farklı ve kararlı iki şekil olarak biçimlerini değiştirmektedirler. Bununda ötesinde, bu alaşımların çoğu önceki şekillerini hatırlayabilmekte ve uygun bir ısıtma veya soğutma ile eski şekillerine dönebilmektedirler. Örneğin; şekil bellek özelliği taşıyan bir malzemeden üretilen

* D.P.Ü. Müh.Fak. Mak.Müh.Bl.

tele önce eğilerek şekil verilir ve sonra ısıtılırsa, tel tekrar ilk durumuna gelebilmektedir.

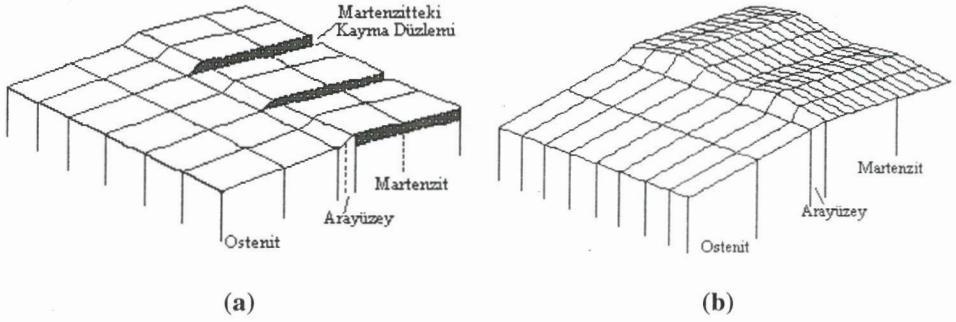
Şekil bellekli alaşımların en karakteristik özelliği martenzitik yapıya sahip olmalarıdır. Bunlar, sabit bir çalışma alanında sıcaklık veya gerilme değişimi ile hem martenzitik hem de (ostenit faza) geri dönme transformasyonlarına (dönüşümlerine) maruz kalabilen alaşımlar grubudur. Bu alaşımlar şekil bellek etkisi veya pseudoelastisite (yalancı elastiklik) gösterir. Soğutma üzerine, belirtilen sıra ile M_s ve M_f sıcaklıklarında martenzitik transformasyon başlar ve biter, ısıtma üzerine belirtilen sıra ile A_s ve A_f sıcaklıklarında ters transformasyon başlar ve biter.

2. MARTENZİTİK DÖNÜŞÜMLER

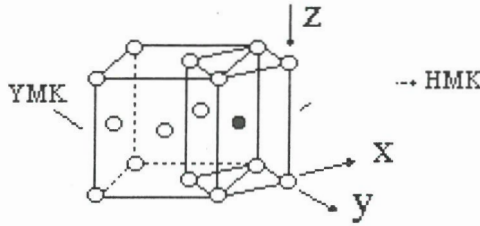
Bilinirki bazı metalik sistemler kristal yapılarındaki dönüşüme bağlı olarak faz dönüşümüne uğrarlar, fakat kimyasal bileşimlerinde bir değişiklik yoktur (Çeliklerdeki Ostenit (YMK) - Martenzit (HMK)). Bunun gibi, difüzyona bağlı olmayan faz değişiklikleri "Difüzyonsuz Dönüşüm" olarak bilinir. Çelikteki; ostenit fazdan hızlı soğutma ile difüzyonsuz dönüşüm sonucu oluşan bu yapıya Alman metalurjist Adolf Martens'in adına istinaden "Martenzit" denir ve transformasyonun bu çeşidi "Martenzitik Transformasyon" veya "Martenzitik Dönüşüm" olarak bilinir (Aygahoğlu, 1996).

Önceleri martenzitik dönüşümün yalnızca çelikte meydana geldiği düşünülmekte idi. Fakat özellikle 1960'lı yıllardan sonra incelenen bazı demir dışı alaşımlarda da martenzitik dönüşümün olabileceği gözlenmiştir (Cu-Zn-Al, Cu-Zn-Si, Cu-Sn, Cu-Sn-Zn, Cu-Al-Ni, Ti-Ni, Ni-Al, Ag-Cd, vd). Uygun karbon miktarına sahip bir çelik belli bir sıcaklığa ısıtıldıktan sonra (A_f) karbonun difüzyonuna izin verilmeyecek şekilde hızlı olarak soğutulduğunda (M_s sıcaklığına kadar) kafesler arasında sıkışan karbon atomları yapının iğnesel ve malzemenin aşırı sert olmasını sağlar. Burada ostenit (ana faz) yapı stabil, martenzit yapı ise metastabilidir. Demir dışı alaşım sistemlerinde ise martenzit bir denge fazıdır. Bu alaşımlardaki dönüşüm, çelikteki gibi hızlı soğutmaya ihtiyaç duymaksızın çok düşük soğutma oranlarında bile (difüzyona mahal vermeyecek şekilde) doğal şekilde martenzitik yapı elde edilir. Yapı stabil fazdadır, çelikteki metastabil martenzit gibi denge durumunun üzerinde ısıtmak, yapıyı ayırıştırmayacaktır (Selimbeyoğlu, 1992; Aksoy, 1989).

Kristalografik yapısından dolayı martenzitik bir dönüşüm yalnızca katı durumda difüzyonsuz olarak meydana gelir. Martenzitik bir reaksiyonda her bir kristal aynı kimyasal bileşimde yeni bir kristale dönüşür (Selimbeyoğlu, 1992; Noyan, 1990). Dönüşüm sırasında her atomun yolu ve gideceği konum belirlidir. Bu sebepten yüksek sıcaklık fazı (ana faz) düzenli ise martenzit fazı da düzenli olmak zorundadır. Martenzitik dönüşüm sırasında, kristal yapı değişikliğini sağlayan kayma ve ikizlenme, belirli ana faz (ostenit) kristal düzlemleri üzerinde olur. Bu düzlemler aynı zaman da ana faz-martenzit ara yüzeyi düzlemidir (Şekil 1) (Fındık, 1995; Erhard, 1993).



Şekil 1. Martenzitin oluş biçimleri (a) kayma, (b) ikizlenme (Noyan, 1990).



Şekil 2. YMK kafesin küçük şekil değişimleri ile HMK kafese dönüşebilmesi (Güleç, 1993)

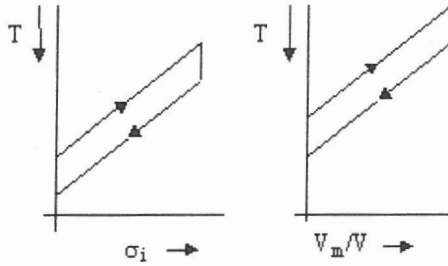
Şekil 2, YMK kafesin aynı zamanda HMT birim hücrelerden oluştuğunu, HMT kafesinde oklar yönünde bir sıra küçük şekil değişimleri ile HMK kafese dönüşebileceğini göstermektedir. Bunun için kafesin z yönünde kısılması, diğer yönlerde uzaması gerekir. Söz konusu şekil değişimleri kayma hareketleri ile sağlanabilir (Güleç, 1993).

Martenzitik dönüşümler genel olarak kayma kökenli olduğundan kaçınılmaz olarak belirli bir şekil değişimine neden olurlar (Fındık, 1995). Hacimdeki değişim her ne kadar değişmiyorsa da küçüktür ve bazı durumlarda deneysel hataların limitleri içinde sıfırdır (Selimbeyoğlu, 1992; Noyan, 1990).

Şekil bellek etkisi gösteren alaşımların hemen hemen hepsi termoelastik martenzitik transformasyon özelliği gösterir. Termoelastik martenzitik transformasyon; sıcaklık düşürüldüğünde martenzit oluşumu ve büyümesi devamlı ise ve sıcaklık yükseltildiğinde geri dönüşte takip edilen yol tarafından martenzitin fire vermesi ve kaybolması devamlı ise gerçekleşir (Noyan, 1990).

Şekil 3, iç gerilmelerdeki ve bu nedenle depolanmış elastik enerji gerilmesindeki (σ_i) gösterilen artma ve transformasyonun ilerlemesinde ölçülen martenzit miktarındaki cüzi artma ve tersine dönmüş transformasyondan dolayı bu özelliklerin azalmasının şematik gösterimini verir. Birçok demir alaşımı ve çelikte olduğu gibi termoelastik olmayan dönüşümler ile termoelastik martenzitik dönüşümlerin karşı-

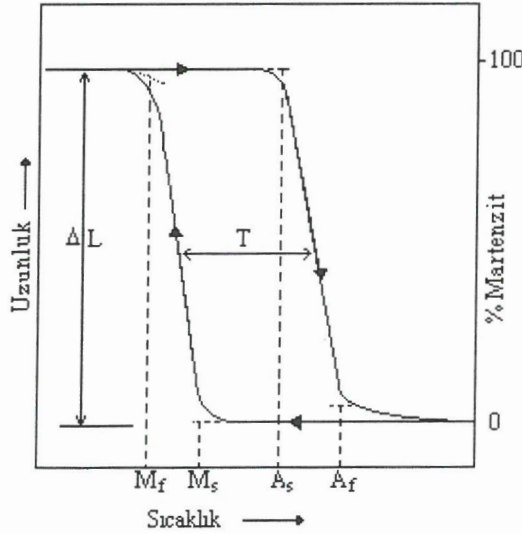
laştırılması, karşılaştırmalı olarak küçük dönüşüm histeresisi tarafından karakterize edilir (Selimbeyoğlu, 1992).



Şekil 3. Sıcaklığın fonksiyonu olarak termoelastik martenzitin oluşumu ve geri dönüşümün şekilsel gösterimi; σ_i , dönüşüm nedeniyle oluşan iç gerilmeler, V_m/V martenzitin kesirli hacmi, T ise sıcaklıktır (Selimbeyoğlu, 1992).

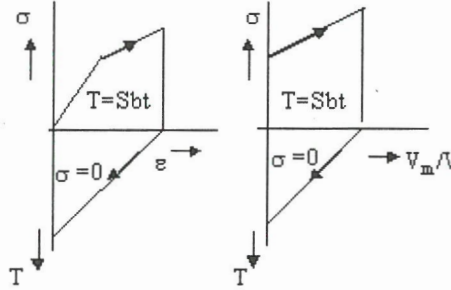
3. ŞEKİL BELLEK OLAYI

Şekil bellekli alaşımların davranışı, yüksek bir sıcaklıkta ostenit fazın düşük şekil değişikliği ve düşük bir sıcaklıkta martenzit fazın yüksek şekil değişikliği arasındaki difüzyonsuz faz transformasyonu (Martenzitik Transformasyon) tarafından sağlanır. Bu olaya "Şekil Bellek Etkisi" (ŞBE) denir ve termoelastik dönüşüm gösteren alaşımların çoğunda bu etki gözlenir (Aygahoğlu, 1996; Leo, 1993).



Şekil 4. Soğutulmuş ve ısıtılmış, yük altındaki şekil bellek özelliğine sahip bir numune için transformasyon - sıcaklık eğrisi (Aygahoğlu, 1996).

Şekil 4'de şekil bellek olayındaki sıcaklık - şekil değişimi - martenzit faz arasındaki bağıntı verilmiştir. Görüldüğü gibi şekil bellek etkisine sahip olan numune-deki sıcaklığın değişmesi ile martenzitik faz ve şekil değişimi arasında bir paralellik mevcuttur (Aygahoğlu, 1996).



Şekil 5. Şekil bellek etkisinde gerilme uygulanarak oluşturulan martenzit gerilme kaldırıldıktan sonra da dengede kalır, ana faza ancak ısıtıldığında geri döner (Selimbeyoğlu, 1992).

Şekil 5'de ise şekil bellek etkisi gösteren bir malzemenin çekme deneyindeki davranışı verilmiştir. Şeklin üst yarısı sabit sıcaklıkta uygulanan gerilmenin artırılması veya azaltılmasına malzemenin tepkisini, alt yarısı ise sonradan uygulanan sıcaklık artışının etkisini göstermektedir (Aygahoğlu, 1996).

4. ŞEKİL BELLEK DAVRANIŞI İÇİN GEREKEN KOŞULLAR

Bütün metaller bellek etkisi göstermez. Çünkü önceden gerekli olan şeyler yalnızca kararlı alaşım sistemlerinde mevcuttur. Şekil bellek davranışı için önceden gerekli olan şeyler birçok araştırmacı tarafından incelenmiştir. Bunları kısaca şöyle sıralayabiliriz:

- Martenzitik dönüşüm termoelastiktir,
- Dönüşümde sıcaklık kararlılığı mevcuttur
- Ana ve martenzitik fazlar düzenli yapıdadır,
- Martenzitik fazdaki uzamalar dislokasyonlar ile değil, ikiz oluşumları veya dizi kusurları ile ilgilidir,
- Eğer yapının düzenli olması göz önüne alınmazsa, ana faz HMK, martenzitik faz ise HSD (Hegzagonal sık düzenli) yapıya sahiptir (Aygahoğlu, 1996; Selimbeyoğlu, 1992)

Şekil bellekli alaşımların şekil bellek davranışlarında yapı kararlı olmalıdır. Bazı şekil bellekli alaşımlarda üretim esnasında ana fazdan martenzite dönüşüm hızlı yapılmalıdır ki, ara fazların oluşumu önlenerek yapının kararlılığı sağlansın. Ayrıca yapının kararlılığını bozacak çalışma alanlarından kaçınılmalıdır (Fındık, 1995)

5. ŞEKİL BELLEK ETKİSİNE TESİR EDEN FAKTÖRLER

Şekil bellek etkisi dört dönüşüm sıcaklık aralığı içerir; A_s , A_f , M_s , M_f . Dönüşüm sıcaklık aralığını, alaşım elementlerinin miktarları doğrudan etkiler. Aynı zamanda farklı fazların çökmesi gibi yaşlanma etkileri ve soğuk işlemin oluşturduğu dislokasyonlar, tamamlanmamış dönüşümler ve dönüşümün termal çevrimi gibi kimyasal olmayan nedenlerde etkili olur (Zeren, 1991).

5.1. Bileşim Faktörü

Şekil bellekli alaşımların bileşimleri değiştikçe dönüşüm sıcaklıklarının da değiştiği görülmüştür. Bu değişim tablo 1'de görülmektedir (Fındık, 1995)

Tablo 1. Cu-Zn-Al için dönüşüm sıcaklıkları (Fındık, 1995)

Alaşım (%ağırlık)	M_s (°C)	M_f (°C)	A_s (°C)	A_f (°C)
Cu-16.0Zn-6.5Al	126	112	121	199
Cu- 6.5Zn-8.8Al	139	118	120	169
Cu-21.5Zn-5.4Al	65	35	46	94
Cu-21.0Zn-5.8Al	52	49	63	95
Cu-20.5Zn-6.0Al	61	45	46	80

Alaşım bileşenlerinin ŞBE üzerine etkisi, - her alaşım için ayrı ayrı uygulanabilecek - elektron atom oranının hesaplanması ile sayısal olarak ifade edilebilir.

Elektron atom oranının hesaplanması ise şu şekilde ifade edilebilir:

ABC alaşımında A, B ve C alaşım bileşenleri; x, y ve z belirttikleri sıraya göre A, B ve C bileşenlerinin alaşım içindeki % ağırlıkları; a, b ve c belirttikleri sıraya göre A, B ve C bileşenlerinin atom ağırlıkları; P, Q ve R belirttikleri sıraya göre A, B ve C bileşenlerinin elektron değerlikleri olsun.

Buna göre;

$$\text{Elektron Atom Oranı} = \frac{P(x/a) + Q(y/b) + R(z/c)}{(x/a) + (y/b) + (z/c)}$$

olarak hesaplanabilir.

Örnek: CuZnAl alaşımında Cu'nun alaşım içindeki ağırlığı %79, Zn'nun alaşım içindeki ağırlığı %16, Al'un alaşım içindeki ağırlığı %4.8 ise elektron atom oranı ne olur ?

Cu için a = 63.546, P= 1, Zn için b = 65.38, Q= 2, Al için c = 26.98154, R= 3 ise

$$\text{EAO} = \frac{1(79/63.546)+2(16/65.38)+3(4.8/26.98154)}{(79/63.546)+(16/65.38)+(4.8/26.98154)}$$

EAO (Elektron Atom Oranı) = 1.360

Tablo 2. Cu-Zn-Al için ağırlık yüzdelere göre Elektron Atom Oranları (Gil, 1992).

Alaşım	% Cu (Ağırlık)	% Zn (Ağırlık)	% Al (Ağırlık)	Elektron-Atom Oranı
1	79.0	16.0	4.8	1.360
2	76.2	17.0	6.6	1.390
3	77.8	16.5	5.5	1.392
4	73.0	22.5	4.3	1.400
5	78.5	15.5	6.0	1.402
6	78.0	16.0	5.9	1.403
7	68.6	28.0	3.1	1.404
8	77.2	17.0	5.8	1.408
9	80.0	13.0	6.8	1.410
10	70.8	25.0	4.0	1.412
11	78.4	15.0	6.5	1.417
12	76.8	16.0	6.5	1.426
13	84.5	6.5	8.8	1.427
14	72.9	21.5	5.4	1.434
15	73.4	21.0	5.8	1.445
16	73.4	20.5	6.0	1.448
17	75.0	18.5	6.5	1.449
18	76.6	16.5	7.0	1.449
19	72.0	22.0	5.8	1.454
20	76.4	16.0	7.5	1.464
21	76.0	16.5	7.5	1.468
22	76.9	15.0	7.9	1.470
23	76.1	16.0	7.7	1.471
24	76.1	16.0	7.8	1.475
25	74.9	17.5	7.6	1.481
26	76.4	15.5	8.1	1.481
27	76.2	16.0	8.1	1.486
28	71.5	21.5	6.8	1.487
29	75.8	16.0	8.2	1.489

Elektron atom oranına bağlı olarak meydana gelebilen martenzitin üç tipi α' tipi, β' tipi ve γ' tipidir. α' tipi ABC olarak sıralı bir şekilde yığılmıştır ve içten ikizlenmiştir. β' tipi martenzit sıralı yığın ABCBCACAB ile sıkı paketlenmiş yüzeylerin sıkı paketi tarafından karakterize edilmiştir. γ' hegzagonal tip martenzitin yapısı sıkı paket düzleminin AB yığılması tarafından karakterize edilir. Delaey ve Cornelis'e göre, martenzitik yapıda β' 'nün γ' 'ye değişimi (CuZnAl alaşımı için) yaklaşık 1.49 elektron atom oranı ile meydana getirilir (Gil, 1993).

Tablo 2'de elektron atom oranı 1.360'dan 1.489'a olan CuZnAl alaşımının kimyasal bileşimleri verilmiştir.

Metalografik incelemeler aracılığı ile görülebilir ki, 1.42 elektron atom oranından daha düşük durumlarda hızlı soğutmadan elde edilen martenzitik yapı α'

tipindedir. Martenzitik plakalar çok büyüktür ve 1.412 elektron atom oranına sahip 10 nolu alaşımdaki gibi ikizlenme tarafından bozulur (Gil, 1992).

Elektron atom oranı 1.42 - 1.45 arasında olduğu zaman α' ve β' martenzit aynı anda var olur. Martenzitin bu iki çeşidinin yarı yarıya bir arada var oluşu 1.434 elektron atom oranına sahip 14 nolu alaşıma tekabül etmektedir (Gil, 1992).

Transformasyon sıcaklıklarının belirlenmesinde kullanılan kalorimetreye göre, numunelerin α' martenzit yapısı ne kalorimetrenin çalışma sıcaklığında (200 °C 'ye kadar) ne de DTA ve DSC sistemlerinde (550 °C 'ye kadar) β fazına (ostenit) geri dönülemezdir. Stabilize olmuş martenzitin bu tipleri termoelastik martenzitik transformasyon göstermez ve bu yüzden şekil bellekli alaşım teknolojik uygulamaları yoktur (Gil, 1992).

Elektron atom oranı 1.45'in üstündeki yani β' martenzitik yapıdaki numuneler ısıtma sonucu martenzit β (ostenit), soğutma sonucu β β' martenzit dönüşümünü sağlayabilmektedir. Ayrıca bu durumdaki numunelerin histeresis sıcaklıklarında düşüktür. Transformasyon ve histeresis sıcaklıklarındaki sonuçlar Tablo 3'de gösterilmiştir. Yaklaşık 10 °C 'deki histeresis değerleri diğer termoelastik olmayan martenzitik transformasyonlar ile karşılaştırıldığında düşüktür (Gil, 1992).

Tablo 3. Transformasyon sıcaklıkları ve histeresis değerleri (Gil, 1992).

Alaşım	M_s (°C)	M_f (°C)	A_s (°C)	A_f (°C)	Histeresis (°C)
17	25	14	29	33	8
18	140	102	132	151	11
19	26	4	28	35	9
20	61	37	42	56	5
21	31	26	28	35	4
22	40	21	27	51	11
23	24	10	18	34	10
24	0	-13	-7	5	5
25	60	3	15	50	10
26	72	42	89	109	37
27	10	-35	-8	2	8
28	68	30	42	77	9
29	16	-26	-13	17	1

Plastik şekil değiştirme altında α' martenzit ısıtma üzerine orjinal şekline geri dönmediğinden bu alaşımlar kısmi bellek etkisi gösterir ve bu yüzden şekil değişimi kalıcıdır. Yapıdaki β' martenzit miktarı ne kadar büyük olursa şekil bellek etkisi de o kadar büyük olacaktır. Bu yüzden şekil belleğinin kullanılacağı teknolojik uygulamalarda tamamen β' martenzit tercih edilir. İki yönlü şekil bellek etkisi, malzemenin ıslah edilmesi ve β fazındaki süperelastisite tarafından bulunur. Bu etkiler, elektron atom oranı 1.45' den 1.49'a kadar olan alaşımlarda mevcuttur. 1.42'den daha düşük elektron atom oranında α' martenzit meydana çıkar ve termoelastik martenzitik transformasyon oluşmaz. 1.49 ' dan daha yüksek elektron atom oranında γ martenzit

ortaya çıkar ve son derece gevrek olmasından dolayı teknolojik uygulamaları yoktur (Gil, 1992).

5.2. Isıl İşlem Faktörü (Yaşlandırma)

Şekil bellekli alaşımlara uygulanan ısıl işlemler esnasında malzemenin şekil bellek davranışı özelliklerinde bazı değişimler olur. Örneğin; Cu-21.3Zn-6Al alaşımına sahip numuneler 1'er dakikalık sürelerde 25 °C ve -45 °C'lik ortamlarda bekletilmiş, neticede A_s ve M_f sıcaklığı düşmüş, A_f ve M_s sıcaklığı artmıştır (Fındık, 1995).

5.3. Termal Çevrim Sayısı

Termal çevrim sayısı da dönüşüm sıcaklıklarını ve dolayısı ile şekil bellek etkisini etkileyen bir faktördür. M_s artan termal çevrim sayısı ile artar, Yani $M_s - M_f$ sıcaklık farkı, termal çevrim sayısının artması ile yükselir. Soğuk işlem sonrası dislokasyon yoğunluğu, termal çevrimin ihmal edilebilir etkisine çok fazla tesir eder. Dislokasyon yoğunluğundaki artış ile M_s azalmaktadır (Fındık, 1995).

5.4. Uygulanan Gerilmenin Etkisi

Malzemenin kristal yapısı atomların dağınık hareketi olmaksızın ana fazdan kolayca meydana gelmelidir. Ostenitin martenzite kristal transformasyonu geçirmesinde, sıcaklığa bağlı olan kritik bir gerilme değeri vardır. Bu kritik gerilme, difüzyonu sınırlamış olmalıdır. Bu, düşük sıcaklıklarda oluşan metallerdeki allotropik dönüşümler veya metallerin yüksek sıcaklık allotropik dönüşümlerine sebep olması için gereklidir (Kenneth, 1976; Brinson, 1993).

Martenzit oluşumu sırasında uygulanan plastik deformasyon sonucu iç gerilmeler arttığı için martenzitin çekirdeklenmesi kolaylaşır. Bunun sonucu olarak plastik deformasyona uğrayan metalik sistemlerde M_s sıcaklığı yükselir (Geçkinli, 1992).

Gerilme altındaki şekil bellekli bir malzemenin martenzit - ostenit dönüşümünde dönüşüm sıcaklıkları farklılık gösterir. M_s sıcaklığı daha düşük olan M_d sıcaklığına, A_s sıcaklığıda daha düşük olan A_d sıcaklığına dönüşür. Bunun sebebi gerilme sonucu oluşan "Gerilme Esaslı Martenzit" dir (SIM ---> Stress Induced Martensite) (Aygahoğlu, 1996; Noyan, 1990).

5.5. Şekil Bellek Etkisinin Sıcaklık İle İlgisi

Martenzitik dönüşüm sırasında yer alan biçimsel değişiklik (çekirdeklenme) yapıda önemli ölçüde elastik deformasyona sebep olur. Bu deformasyon için gerekli enerji miktarı iki fazın serbest enerjileri arasındaki farktan kaynaklanır. Bu durumda, dönüşüm ancak aşırı soğuma sağlandığında, yani serbest enerji miktarındaki değişimin büyük olması halinde gerçekleşir (Geçkinli, 1992; Aksoy, 1989).

Pseudoelastik (Süperelastik)

Cu-Zn	Fe ₂ Be
Cu-Zn-X	Fe ₃ Pt
Cu-Al-Ni	In-Tl
Cu-Al-Mn	Ni-Ti
Ag-Cd	Ti-Ni
Au-Cd	Au-Cu-Zn
Cu-Au-Zn	Cu-Sn

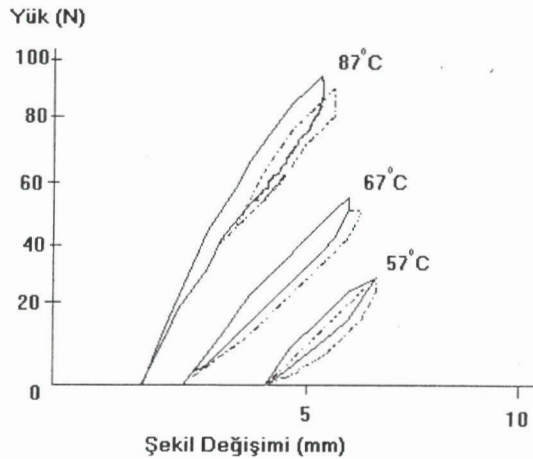
İki Yönlü Şekil Bellek Etkisi

In-Tl
Ti-Ni
Cu-Al
Fe-Mn-C
Cu-Zn
Ni-Al
Cu-Al-Ni
Cu-Zn-Al

NiTi ve bakır esaslı alaşımlar gibi tipik şekil bellekli alaşımlar düzenli yapıya sahiptir ve termoelastik martenzitik transformasyona maruz kalırlar. Bazı ostenitik çeliklerde gerilme esaslı martenzitik transformasyon tarafından ŞBE gösterirler (Yang and Kim, 1992).

ŞBA'ların kendine has mekanik özellikleri malzemenin geçmişi, sıcaklık ve gerilmenin fonksiyonu olarak iç kristallerdeki transformasyona bağlıdır (Brinson and Lammering, 1993). Sınırlanan şekil bellek dönüşümü tarafından, şekil değişikliği ile birleştirilen elverişli kuvvet, yapılan iş veya etkilenen diğer şeyler için kullanışlı hale getirilir. Mekanik gerilmelerin üretilmesi yalnızca malzeme tarafından etkilenir. Bir parçanın deformasyonu, %100'lük şekil dönüşümünü başarmada %2-9 arası bir iç şekil değişikliği olarak sınırlandırılır (Selimbeyoğlu, 1992; Noyan, 1990).

ŞBA'lar mükemmel yorulma özelliğine de sahiptirler. Örneğin; şekil bellekli alaşımlar klasik alaşımlardan 10 kat daha fazla periyodik şekil değişikliğine maruz kalabilir. Bununla beraber, eğer ölçü aleti gibi bir parça aşırı yüklenirse veya uzun periyotlar için alaşımın çalışma alanının dışındaki sıcaklıklara maruz kalırsa, metal termal veya mekanik yorulma tarafından hasara uğrayabilir veya şekil bellek etkisi zayıflayabilir (Selimbeyoğlu, 1992; Noyan, 1990).



Şekil 7. Çevrimden önceki ve sonraki yük sapma Karakteristikleri (Selimbeyoğlu, 1992)

ŞBA'nın uzun dönem davranışı belirlendiği zaman bu, kullanılması düşünülen uygulama alanının belirlenmesinde yani ŞBA'nın seçiminde önemlidir. Şekil 7'deki 75000 çevrimden sonra, bir ölçü aletinin yük-sapma-sıcaklık spektrumu, 10 çevrimden sonraki ile mukayese edilmiştir. Uzun süreli davranışta bozulmayı artıran durumlar aşağıdaki gibidir:

- (i) *Yüksek sıcaklığa maruz kalan ŞBA'nın yapısında metalurjik değişimler meydana gelebilir.*
- (ii) *Kararsız rejim altındaki sıcaklıklarda ve yüksek gerilme seviyelerinde malzemenin yapısı bozulabilir (Selimbeyoğlu, 1992).*

Bununla beraber, ŞBA belirlenen azami sıcaklık ve maksimum şekil değişimi sınırları altında uzun dönem emniyetli performansla görevini sürdürebilir (Noyan, 1990).

7. UYGULAMA ALANLARI

Pratikteki şekil bellekli alaşımların kullanımı iki kategoriye ayrılabilir: ters çevrilemez ve ters çevrilebilir kullanımlar. Ters çevrilemez kullanım; yalnızca geri dönen şeklin kullanımını, şekil geri dönüşünün kullanımı ve ters transformasyon gerilmesinin kullanımını kapsar. Şekil bellekli alaşımların termal kontrol elemanı olarak kullanımı ve termal enerjiden mekanik enerjiye enerji dönüşümü için kullanımlar ters çevrilebilir kullanımın örnekleridir (Tadaki, 1988).

Şekil bellekli alaşımlar birçok uygulama alanına sahiptir. Bank motoru yani, güneş ısısını kullanarak Nitinol telin şeklini değiştirerek güç üreten motor belkide en ilginç uygulamadır. Bir kan pıhtısının gidişini önleyici süzgeçler ve kalp pompaları gibi hayat kurtarıcı cihazların dizaynı, bu alaşımların (Nitinol) biyotipteki uygulamalarına örneklerdir. Endüstride benzer alaşımlar kaplin olarak birbirleriyle bağlantısı zor olan parçaların birleştirilmesinde kullanılmaktadır. İşçi tasarrufu sağlayan termostat şalterleri, pencere açıcılar ve otomotiv parçaları, tekrar eski yerine geçebilen solenoidler, pnömatik ve hidrolik silindirler, doğrusal hareketli mekanizmalar, elektrik motoru ve dişli kutusu, kısa stroklu cihazlar ve birçok günümüzde kullanılan elektronik ekipmanlar olabilir (Hansen, 1988; Noyan, 1990).

8. SONUÇ

Mekanik ve bilimsel harikalarla dolu bir dünyada, şekil bellekli alaşımlar olağan bir şey olarak görünebilir. Fakat kusursuz metalleri gerektiren ideallik düzeyi, araştırmaları hızlandırmış ve çok karmaşık elektriksel ve mekanik çözümler için gerekli olan isteklere şimdiden kolayca ulaşma olanağını yaratmaktadır.

KAYNAKLAR

- Aksoy T., Önel K., 1991, "**Malzeme Bilgisi I**", Dokuz Eylül Üniversitesi
 Aygahoğlu A., 1996, "**Şekil Bellekli Alaşımlar ve Uygulama Alanları**",
 Dumlupınar Üniversitesi Yüksek Lisans Tezi.

- Brinson L.C., Lammering R., 1993, "Finite Element Analysis of The Behavior of Shape Memory Alloys and Their Applications", **International Journal of Solids and Structures**, v 30 (23), pp. 3261-3280.
- Erhard E., Erhard K., 1993, "**Characterization of Shape Memory Alloys by Hardness Indentations**", *Praktische Metallographie*, v. 30 (10), pp. 507-518.
- Fındık F., Oğur A., Karadeniz E., Genel K., Özgirgin M.C., 1995, "**Hafızalı Malzemeler Ve Üretimi**", 6. Denizli Malzeme Sempozyumu.
- Geçkinli A.E., 1992, "Martenzitik Dönüşümler", **Faz Dönüşümleri** (Ders Notu), İ.T.Ü. Kimya-Metalurji Fakültesi, Sf. 54 -59.
- Gil F.J., Guilemany J.M., 1992, "**The Determination of The Electron to Atom Ratio Interval Corresponding to The Change in The Martensitic Structure From α' to β' in Cu-Zn-Al Shape Memory Alloys**", *Materials Research Bulletin*, v. 27 (1), pp. 117-122.
- Gil F.J., Guilemany J.M. , 1993, "**Influence of The Electron-to-Atom Ratio on The Martensitic Transformation Enthalpy and Entropy Values in Cu-Zn-Al Shape Memory Alloys**", *Journal of Alloys and Compounds*, v. 194 (1), pp. L9-L10.
- Güleç Ş., Aran A., Çeviri (Bergel H.J., Schulze G.), 1993, "**Malzeme Bilgisi**", Cilt I, İ.T.Ü. Makina Fakültesi.
- Hansen J., 1988, "**Shape Memory Alloys**", *Material Science* (Çev. Görgülü F., "Hatırlayan Metaller" Bilim Teknik Dergisi)
- Kenneth M., Thomas H., 1976, "**An Introduction to Materials Science And Engineering**", pp. 361-364.
- Leo P.H., Shield T.W., Bruno O.P., 1993, "**Transient Heat Transfer Effects on The Pseudoelastic Behavior of Shape Memory Wires**", *Acta Metallurgica et Materialia*, v. 41 (8), pp. 2477-2485.
- Noyan E., 1990, "**Shape Memory Alloy Design**", Doctor of Philosophy Thesis, Middle East Technical University.
- Selimbeyoğlu E., 1992, "**Design of Shape Memory Alloys Actuators**", Doctor of Philosophy Thesis, Middle East Technical University.
- Tadaki T., Otsuka K., Shimizu K., 1988, "**Shape Memory Alloys**", *Material Science*, v 18, pp 25-45.
- Zeren A., Zeren M., 1991, "**Biçim Bellekli Malzemeler**", Uludağ Üniversitesi Balıkesir Mühendislik Fakültesi, II. Balıkesir Muhendislik Sempozyumu.

