

BAKIR ESASLI ŞEKİL BELLEKLİ ALAŞIMLARIN ÜRETİMİ VE ÇEKME DENEYİ İLE KARAKTERİZASYONU

Bedri BAKSAN, Remzi GÜRLER

Eskişehir Osmangazi Üniv., Metalurji Enstitüsü Eskişehir, baksan@ogu.edu.tr.

ÖZET

Bu çalışmada Şekil Bellekli Alaşımlar (ŞBA), tarihi gelişimi, uygulama şekilleri ve karakteristik özellikleri ile hakkında kısa bilgiler giriş kısmında bahsedilmekte. Daha sonraki kısımlarda ŞBA'ların genel üretim yöntemleri, ŞBA'ların karakterizasyonunda kullanılan metotlar hakkında bilgiler verilmekte. Son bölümde ise konuya esas olan Cu esaslı ŞBA'ların üretimi, çekme deneyi ile ilgili çalışmalar ve elde edilen sonuçlar verilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Şekil Bellekli Alaşımlar, Akıllı Malzemeler, Üretim, Karakterizasyon, Çekme Deneyi

THE PRODUCTION OF COPPER BASED SHAPE MEMORY ALLOYS AND CHARACTERIZATION BY MEANS OF TENSILE TESTING

ABSTRACT

In this study, a brief historical development, application types, characteristic properties of Shape Memory Alloys (SMA) was given in introduction section. Information about the general production techniques and the characterization methods of the SMA's are given in the latter sections. In the final section, information about the recent studies which was the main subject of this study: the production and characterization of SMA's by tensile tests were given.

Keywords: Shape Memory Alloys, Smart Materials, Production, Characterization, Tensile Testing

1. GİRİŞ

Şekil bellekli alaşımlar (ŞBA) aslında günlük hayatta oldukça fazla kullandığımız, fakat şekil belleği yönüyle pek bilinmeyen malzemeler grubunu oluşturmaktadır. Günlük hayatta sıkça kullandığımız bu malzeme grubuna örnekler olarak, kolay deforme olmayan gözlük çerçeveleri, çay-kahve otomatları, bazı otomobil parçaları, tıp alanında özellikle kalp ve damar hastalıklarında çok yaygın kullanılan tıp gereçleri ve ayrıca sismik uygulamalarda kullanılan darbe sönmüleyici malzemeler sayılabilir.

ŞBA'ların üretim yöntemleri hakkında genel bilgiler ilk bölümlerde verilmiş, daha sonraki bölümlerde ŞBA'ların karakterizasyon yöntemleri ve son olarak bu amaçla yapılan çalışmalar ve yönelimlerden bahsedilmiştir.

1.1. Şekil Bellekli Alaşımlar

Şekil Bellekli Alaşım (ŞBA) terimi, uygun ısı işlemlerinden önce belirlenmiş şekline geri dönebilme kabiliyeti olan metalik malzemeler için kullanılır. Genel olarak malzemeler, oldukça düşük sıcaklıklarda plastik olarak deforme edildikten sonra, daha yüksek sıcaklıklara maruz kaldıklarında, deformasyondan önceki şekillerine geri dönerler [1]. Malzemenin sadece ısıtma ile şekli hatırlayabilmesi "tek yönlü şekil belleği" olarak isimlendirilir. Şekil 1, bu özelliği şematik olarak göstermektedir. Bazı malzemeler, ısıtmayı takiben tek soğutulduklarında değişim gösteriyorsa bu malzemeler "iki yönlü şekil belleği" olduğu söylenebilir [2].

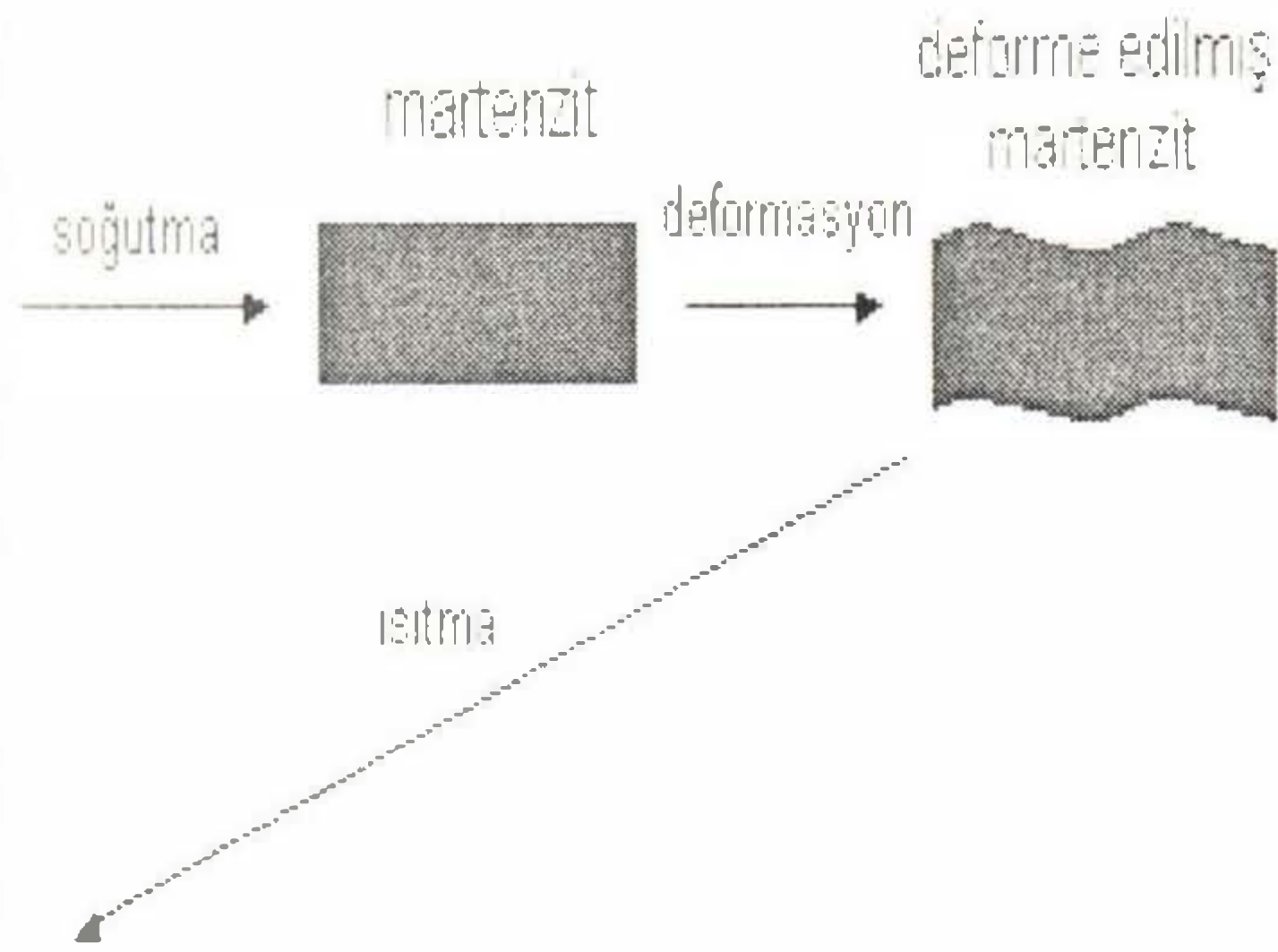
Ticari amaçlı, şekil bellek özelliği gösteren alaşım sayıları çok olmasına rağmen, bunlardan bazıları şu

genişiminin geri dönüşü sırasında oldukça büyük deformasyonlar oluştururlar. Bu grup alaşımlar içinde en önemlileri nikel-titanyum alaşımları ve CuZnAl ve CuAlNi gibi bakır esaslı alaşımlardır.

Şekil bellekli alaşımların (ŞBA) ilk keşfi Chang ve arkadaşlarının 1932'de bulduğu Au-Cd alaşımı ile başlar, daha sonra 1938 de bu özellik Cu-Zn alaşımlarında görülmüştür. En son bilinen ve yaygın kullanılan alaşım ise bir tesadüf sonucu bulunan Ni-Ti alaşımıdır [3].

Şekil bellekli alaşımlar termoelastik martenzit olarak da tanımlanabilir. Martenzitik durumda, alaşımda dönüşüm sıcaklığının altında uygulanan deformasyon etkisiyle ikizlenme mekanizmasındaki sonuçları gösteren martenzitik dönüşüm olarak tanımlanabilir. Meydana gelen dönüşüm birinci dönüşüm olması rağmen tek bir sıcaklıkta gerçekleşen alaşımın tipine bağlı olarak farklı sıcaklıklarda görülebilir. Isıtma ve soğutma sırasında belli bir sıcaklıkta gerçekleşmediği için bir histerisizi görülür. Bu histerisiz değeri her bir alaşım için farklılık gösterir [1, 2, 4].

Bunun bir diğer ilginç özelliği, düşük sıcaklıklarda elastik gibi davranabilmeleridir. Çok az bir deformasyon uygulanması ile kolaylıkla deforme



deformasyonla elde edilmiş şekil

Şekil 1. Tek Yönlü Şekil Bellek Etkisi [5].

edilebilirler, uygulanan yük kaldırıldığında tekrar eski şekillerine geri dönebilirler. Fakat yüksek sıcaklıklarda diğer metaller gibi davranırlar, bu sıcaklıklarda uygulanan deformasyon kalıcıdır, malzeme tekrar eski haline geri dönemez [1, 4, 5].

ŞBA'ların gösterdiği bir diğer özellik ise, süper elastisite (veya pseudo-elastisite) dir. Bu durumda, küçük bir

kuvvet ile oldukça fazla deformasyon oluşabilir, buna rağmen yük malzeme üzerinden kaldırılırsa, malzeme ısıtmaya gerek kalmaksızın orijinal şekline geri döner.

ŞBA'ların uygulamalarına bakıldığında ŞBA'ların kullanıldığı cihazlar için bir çok patentli buluş vardır. Cihazların ve kullanılan yerlerin özelliklerine göre ŞBA'ların ticari olarak uygulamaları belli gruplar halinde toplanabilir.

Serbest geri dönüşümlü alaşımlar: Martenzitik yapıda iken deforme edilir, tek fonksiyonel özellik, ısıtma etkisi ile önceki forma geri dönüş şeklindedir. Bunun en bilinen uygulaması, kan pıhtılarını tutmaya yarayan filtrelerdir [2]. NiTi telden yapılmış filtre kanca şekline gelerek kan pıhtılarını tutar. Bu parça üretildikten sonra soğuk etkisi ile büzülür ve şırınga ile damar içine girmesi sağlanır, nihayetinde ise vücut ısısına gelindiğinde fonksiyonunu yerine getirecek şekilde açılır.

Kısıtlı geri dönüşüm: Bu uygulamaya en güzel örnek, hidrolik boru birleştirmede kullanılan bağlantı elemanlarıdır (fittings). Bu parçalar silindirik gömlek şeklinde, birleştirilecek boruların çapından çok az küçük olacak şekilde imal edilir. Martenzitik durumda iken çap büyür, ostenitik faza gelindiğinde, yani ısıtıldığında çapı küçülerek boruların uçlarını sıkıca kavrar.

Hareket vericiler: Bunlar, genellikle elektrik tesisatlarında bağlantı elemanlarının ısıtılması ile bir elektrik kontağı oluşturarak bir cihazın açılması veya kapanması şeklinde görev yaparlar, hareket verici güç kaynağı elektrik, ısı vs. gibi herhangi bir enerji olabilir.

Oransal kontrol: Bu özellik ŞBA'dan yapılmış mekanizmanın sadece belli bir bölgesinin ŞB etkisi ile çok hassas miktarda hareket edebildiği vana gibi cihazlardır. Buradaki hareket miktarı 0,25 mm kadar olabilir.

Super elastik uygulamalar: Bu şekilde uygulamalar ile çok sık karşılaşmak mümkündür. En iyi bilinen örnekler NiTi'dan yapılmış gözlük çerçeveleridir. Bu uygulamalarda büyük miktardaki darbeler herhangi kalıcı hasar olmaksızın absorplanabilmektedir.

Şekil bellekli alaşımlarda bazı özellikler de görülmektedir. Bunlar;

Süperelastisite: Alaşım, diğer metallerle oranla daha fazla olmak üzere belli bir sınıra kadar tekrar eski haline gelebilecek şekilde bükülebilir.

Tek yönlü bellek etkisi: Alaşımın bir mekanik veya termik etki ile ilk şekline geri dönebilmesidir.

İki yönlü bellek etkisi: ŞBA alaşımın eğitilme (training) işleminden sonra biri kritik değer üzerinde diğeri ise altında olan iki sıcaklık değeri arasında şekillerini koruyabilmesidir.

Lastiğimsi davranış: Alaşım bükülüp bırakıldığında belli bir miktar kalıntı deformasyonu bünyesinde tutar, malzeme tekrar çalıştırıldığında bu kalıntı deformasyonun artmasına neden olur.

Darbe emme özelliği: Alaşım mekanik darbe ve şokları absorplayabilmektedir.

Bu özellikler, katı faz dönüşüm mekanizması olan ostenit olarak isimlendirilen yüksek sıcaklık fazının kristalografik olarak tersinir bir şekilde martenzit olarak isimlendirilen düşük sıcaklık fazı olan diğeri bir faza dönüşmesi esasına dayanan ve martenzitik dönüşüm olarak isimlendirilen dönüşümler ile sağlanır [6].

ŞBA'ların, potansiyel kullanım alanlarından dolayı "Akıllı Malzemeler" olarak gelecekteki uygulamalarının oldukça önem kazanacağı kolaylıkla söylenebilir. Bu malzemelerin en önemli özelliklerinden biri enerji tasarrufu açısından diğeri makineler ile kıyaslandığında çok daha fazla önem kazanabilir, çünkü hareket vericiler olarak kullanımda birçok yerde elektrik enerjisi kullanmadan sadece ortam sıcaklığından istifade ederek mekanizmaları hareket ettirmek mümkündür. Akıllı malzemeleri kompozit yapılar şeklinde yaparak, örneğin beton bir köprü içine hissedici veya hareket verici olarak kullanarak, bu köprülerin bünyesinde oluşacak çatlakların veya korozyonun erkenden tespit edilmesi mümkün olabilir [5].

2. ŞEKİL BELLEKLİ ALAŞIMLARIN ÜRETİM TEKNİKLERİ

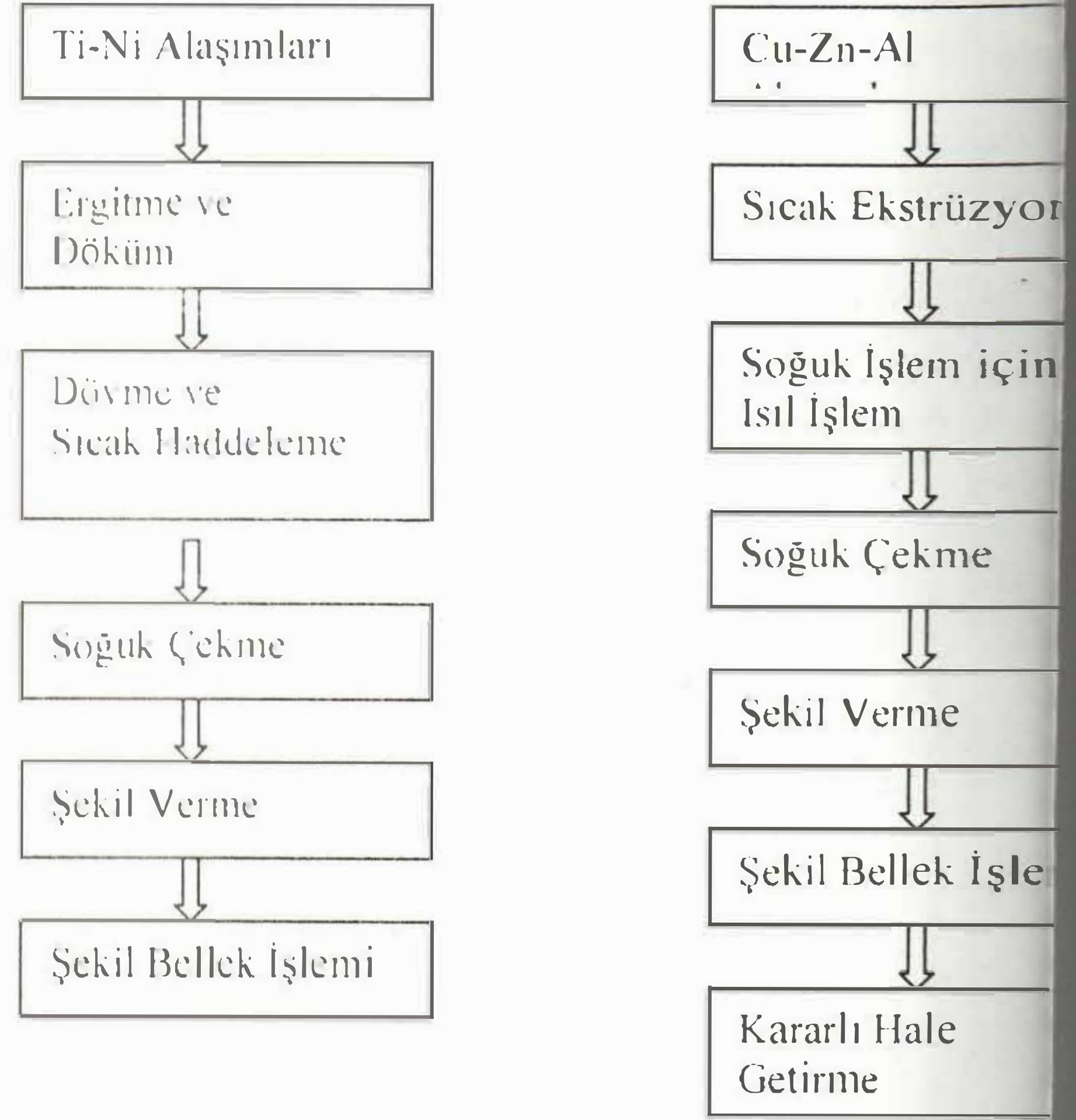
Şekil bellekli alaşımların üretim teknikleri alaşımın tipine göre ve üretim kolaylığı açısından farklılık göstermektedir. Başlıca üretim teknikleri aşağıdaki gibi sınıflanabilir [7].

- Döküm ve tel çekme
- Toz metalurjisi
- Hızlı soğutma(melt spinning, rapid quenching) tekniği

2.1. Döküm

Alaşımın tipine göre döküm işlemi ve döküm sonrası işlemler farklılık göstermektedir. Şekil 2. de Ti-Ni ve Cu-Zn-Al alaşımları için döküm ve sonrasında uygulanan işlem aşamaları gösterilmektedir. Bu iki malzeme arasındaki üretim farklılığı malzemelerin döküm ve imalat sırasındaki göstermiş oldukları davranışlardan kaynaklanır. Örneğin, Ti alaşımlarının dökümü, oksijene

karşı büyük ilgisinden dolayı kesinlikle oksijen olmaması için asal gaz atmosferinde veya vakumda gerçekleştirilir. Cu-Zn-Al alaşımlarının bir curuflaştırıcı kullanılarak dökümü mümkündür. Fakat Cu alaşımında ise Zn buharlaşması veya Al'un yoğunluk farkı nedeniyle yüzeyde birikmesi söz konusu olmaktadır, bu alaşımın ergitme işlemi curuflaştırıcı ilavesi ve karıştırmanın etkin olabilmesi için çekirdeksiz tip indüksiyon ocaklarında gerçekleştirilir.



Şekil 2. Ti-Ni ve Cu-Zn-Al alaşımlarının üretim prosesleri [7].

Diğeri işlem kademelerinin gerekçeleri bilindiği üzere sıcak işlem ile malzemeye büyük oranda şekil değeri yaptırabilmek mümkündür. Sıcak işlem ile büyük deformasyonların küçültülebilmesi için en uygun yollardan soğuk deformasyondur. Bu nedenle sıcak işlem (haddeleme, dövme gibi) takiben soğuk işlem uygulanmalıdır. Cu-Zn-Al alaşımları gerilmeli korozyona karşı hassas olduğu için Ti-Ni alaşımlarından farklı olarak yüzeyin korunması için ince bir kalay tabakası kaplama işlemi yapılır [7].

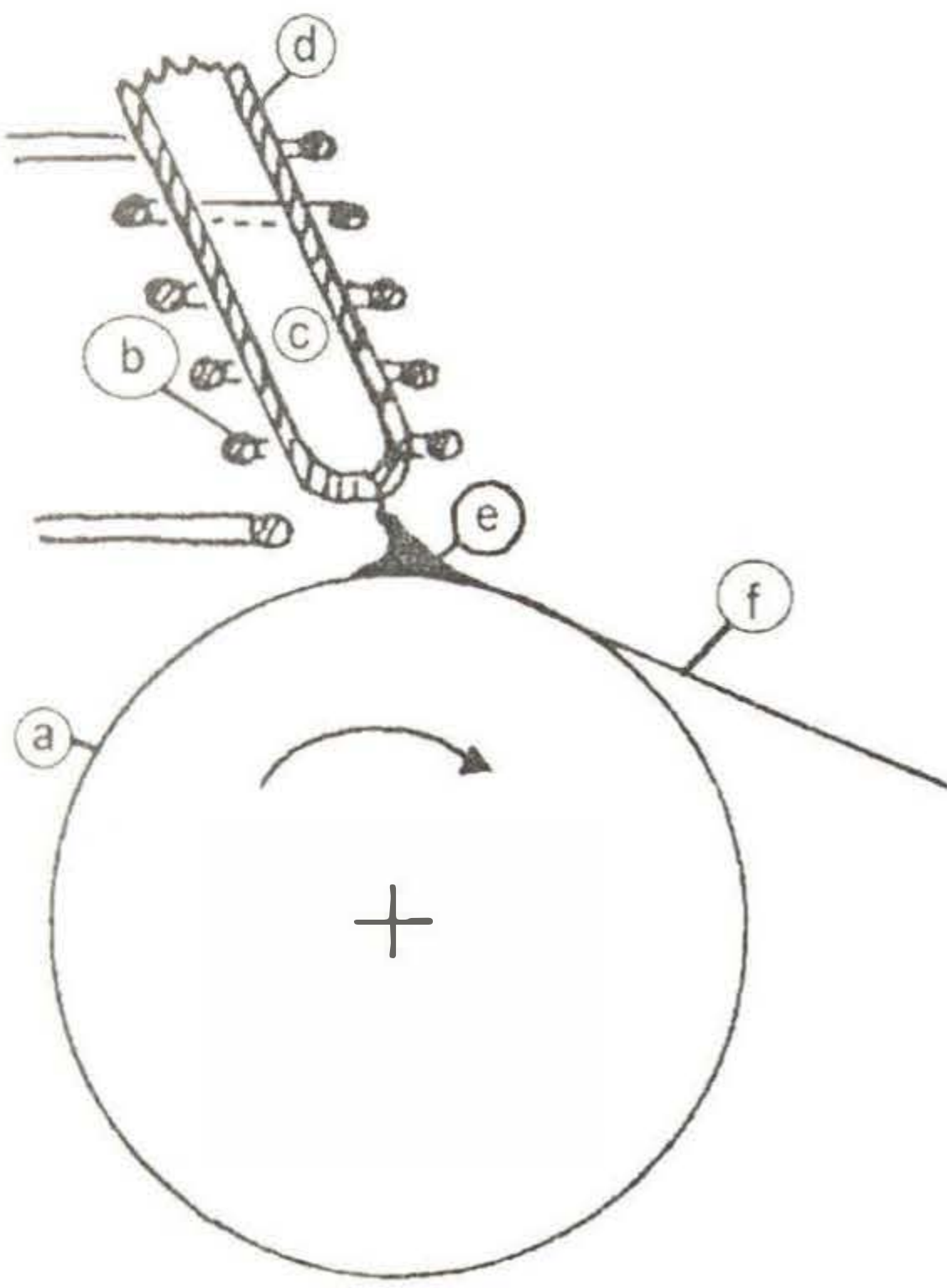
2.2. Toz Metalurjisi

Toz metalurjisi ile üretimde malzemelerin tozları kullanılmaktadır. Bu yöntemde de malzeme özelliklerinden dolayı sınırlamalar vardır, örneğin Zn-Al alaşımlarının tozları su atomizasyonu üretilirken, Ti-Ni alaşımları sadece gaz atomizasyonu veya döner elektrod yöntemi ile üretilmektedir. Bundan sonraki işlem kademeleri bilinen HIP (izostatik presleme), CIP (soğuk izostatik presleme) sinterleme gibi diğeri toz metalurjisi üretim i

adimelerinden oluşmaktadır. Bu üretim tekniği ile elde edilen son ölçülerde ŞBA parça üretimi mümkündür [7].

3.3. Hızlı Soğutma

Bu işlem induksiyon akımları veya rezistans teli yardımıyla ergitilmiş metal veya alaşımın, itici bir gaz atmosferiyle küçük bir deliği (0.5-1.5 mm çapında) olan kuartz tüp içinden hızla dönen bakır yüzeyli bir tambur üzerine düşürülerek metal şerit elde edilmesi esasına dayanır. Soğuma hızını daha da artırabilmek için dönen tambur karbon dioksit veya sıvı azot gibi, çeşitli ortamlar kullanılarak soğutulabilir. Böylece çok büyük soğuma hızları elde edilebilir. Bu soğuma hızı 10^4 - 10^{10} K/s mertebelerindedir. Şekil.3'te [8] hızlı soğutma düzeneği olarak gösterilmektedir. Bu teknikte üretilen malzemelerin taneleri küçüktür ve yarı kararlı fazlar içinde bulunmaktadır. ŞBA' larda önemli olan bilindiği gibi kararlı ostenit fazından, yarı kararlı martenzit fazına geçiştir. Bu yöntemle malzemenin ostenit fazına dönüşümü doğrudan ergimiş metal ile sağlanmakta, yarı kararlı martenzit fazına geçiş ise herhangi ilave bir ısıtma gerek kalmaksızın tek bir işlem kademesiyle, hızlı soğutma tekniği ile sağlanabilmektedir. Bu teknikte malzemenin diğer bir avantajı, bilinen haddeleme teknikleri kullanılmadığından problem olan gevrek malzemelerin ince şeritler halinde üretiminin kolaylıkla gerçekleştirilmesidir. Örneğin Ti-Ni-Cu alaşımında bakır içeriği % 10 dan fazla olursa, sıcak haddeleme yapılamayacak kadar gevrek olur. Bu üretim tekniği ile elde edilen şeritlerin ŞBA'ların bir özelliği olan tersinirliğe sahip olmalarıyla elde edilmiş tekniklerle üretilmiş malzemelere göre önemli bir avantajı vardır.



Şekil 3. Hızlı Soğutma Cihazı. (a) Bakır Tekerlek, (b) Yüksek Frekans Indüksiyon Bobini veya Rezistans Teli, (c) Ergimiş Metal, (d) Kuartz tüp, (e) Ergimiş Metal Birikintisi, (f) Katılaşmış Şerit

önemli bir özelliktir. Bunun da nedeni malzeme yapısı ve hızlı soğutma sırasında oluşan yaklaşık 10^{12} dislokasyon/cm² gibi çok fazla dislokasyon yoğunluğudur [9]. Soğuma hızının çok yüksek olmasından dolayı katının kimyasal bileşimi, sıvı fazdaki bileşim ile aynı kalır, başka bir deyişle homojen mikroyapı sıvı fazdan doğrudan elde edilmiş olur.

Bakır esaslı ŞBA'lar 5 m/s çevresel hızda, hızlı soğutma yapılabilmektedir. Bu üretim tekniği ile bütün Ti, Fe ve Cu esaslı ŞBA'lar başarıyla üretilebilmektedir [9]. Hızlı soğutma işleminin diğer bir faydası da termomekanik işlem, mekanik alaşımlama, toz metalurjisi gibi ilave bir işleme gerek kalmaksızın tane inceltme işleminin yapılabilmesidir. Bu yöntemin bir diğer avantajı da ŞBA'ların en büyük problemi olan yorulma ve bunun sonucu kırılma problemine karşılık olarak mikroyapının iyileştirilmesinin sağlanmasıdır. Çünkü tanelerin bu yöntemle küçültülmesi ile kırılma ve yorulma ömrü belirgin bir ölçüde iyileşmektedir [10, 11].

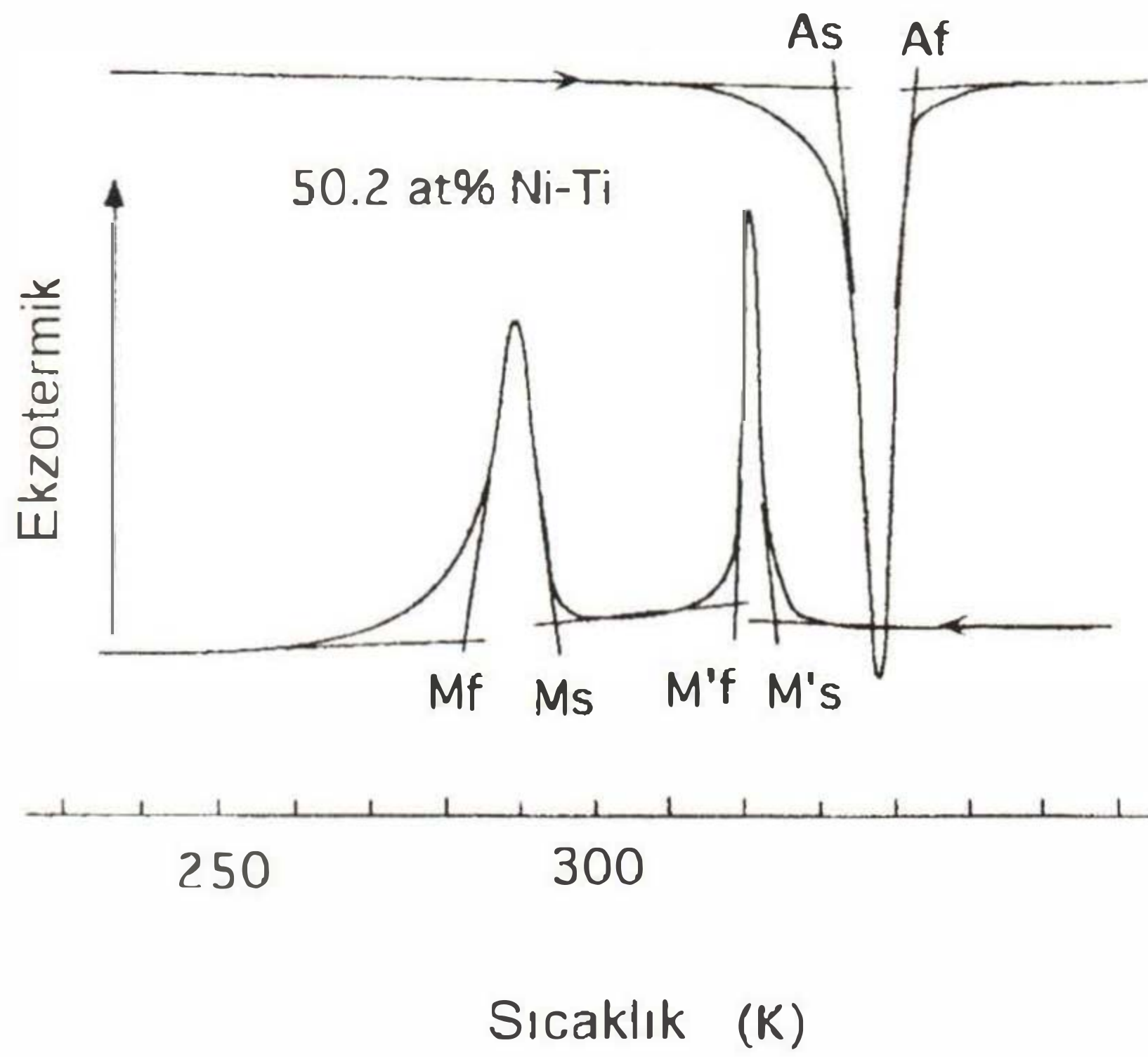
3.ŞEKİL BELLEKLİ ALAŞIMLARIN KARAKTERİZASYONU

ŞBA'ların dönüşümlerinin karakterizasyonunda başlıca dört temel metod kullanılmaktadır [2]. Burada en fazla kullanılan bu dört metod hakkında bilgi verilecektir.

En temel ve doğrudan karakterizasyon tekniği diferansiyel taramalı kalorimetre veya en genel bilinen ismi ile DSC'dir. Bu teknik, çok küçük miktarda numune kullanılarak dönüşümün gerçekleşmesi beklenen sıcaklık aralığında ısıtma ve soğutma sırasında, numunenin absorbe ettiği veya verdiği ısının ölçülmesi esasına dayanır. Numune miktarının birkaç miligram olması ölçüm için yeterlidir. Numuneler herhangi bir gerilme altında olmadığı için ölçüm sonuçları olumsuz etkilenmez. Numune ısı alırken ve verirken oluşan endotermik ve ekzotermik pikler, çok belirgin bir şekilde reaksiyon başlangıç ve bitişini gösterir [2].

Şekil 4'te DSC yardımı ile elde edilmiş karakteristik bir DSC taraması görülmektedir. Alttaki tarama çizgisi soğutma sırasındaki, üstteki tarama çizgisi ise ısıtma sırasında oluşan pikleri göstermektedir. Dönüşüm sıcaklıklarının belirlenmesi taban çizgisi ile en büyük gradyandan uzatılan doğrunun kesiştiği noktalar birleştirilerek yapılır. M_s , M_f , A_s ve A_f sıcaklıkları sırasıyla soğutma ve ısıtma sırasında oluşan martenzit dönüşüm başlangıç ve bitiş sıcaklıkları, M_s' ve M_f' ise Ti-Ni alaşımlarında görülen R fazı dönüşümünü göstermektedir [7].

İkinci metot ise, ısıtma ve soğutma sırasında malzemenin elektrik direncinin ölçülmesidir. Dönüşüm esnasında numunenin elektrik direncinde ilginç değişimler ve pikler görülür. Bu ölçüm değerleri, faz değişimleri ve mekanik özellikler ile bağdaştırılmaya çalışıldığında her zaman çok başarılıdır demek güçtür. Eğer, malzeme dönüşüm sıcaklıkları arasında tekrarlı şekilde ısıtılıp soğutulursa elektrik direnç eğrilerinde büyük değişimler sıklıkla görülmektedir.

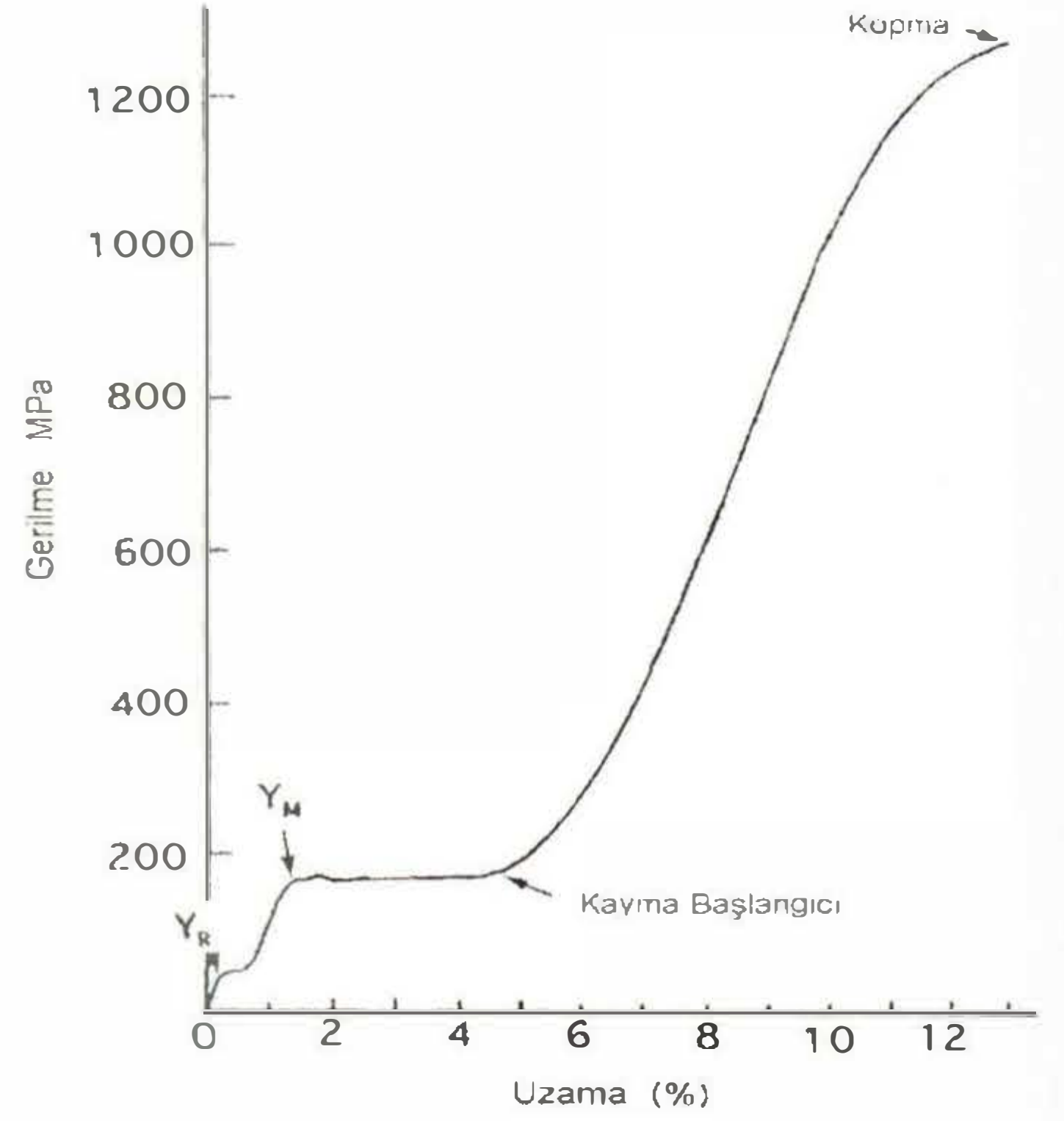


Şekil 4. ŞBA'larda görülen karakteristik DSC taraması [7]

Alaşımların mekanik özellik karakterizasyonunda en doğrudan ölçüm metodu, numuneyi sabit bir yük altında ısıtmak ve soğutmak suretiyle her iki yönde oluşan gerilmelerin kaydedilmesi şeklinde yapılır. Bu deneyde elde edilen M_s ve A_s gibi noktalara bakıldığında, bu değerlerin DSC taraması ile elde edilen değerlerden biraz daha yüksek olduğu görülür. Bunun nedeni, DSC taraması, gerilme uygulanmamış numunelerle yapılır, böylece gerilme altında martenzit oluşmamış olur. Bilindiği üzere gerilme uygulanması ile dönüşüm sıcaklığı artmaktadır. Bu deney, şekil belleği kullanarak mekanik çalışan cihaz yapımında tasarım aşamasında faydalı olabilecek kriterlerin belirlenmesini sağlar. Bu deneyin dezavantajı ise numunelerin yapımının zor olması ve sonuçların deney şartlarına oldukça duyarlı olmasıdır [2].

En son genel kullanılan karakterizasyon yöntemi ise, malzemeye çekme deneyi uygulamak suretiyle gerilme-uzama özelliklerinin belirlenmesidir. Saburi [9] tarafından Ti-Ni alaşımlarında yapılan çalışmaya göre, eş atomlu Ti-Ni alaşımlarının çekme deneyi süresiz akma ve büyük Lüders uzamaları ile karakterize edilmektedir. Şekil.5 Ti-at.% 50 Ni içeren alaşımların gerilme-uzama eğrisini göstermektedir. İncelenen numune, 303 K'de soğuk deformasyon işlemi takiben 673 K sıcaklıkta 3,6

ks süreyle tavlannmıştır. Bu sıcaklık R_f (316 K) sıcaklığının altında M_s (246 K) sıcaklığının da üzerinde bir sıcaklıktır, bu nedenle yapı deneyler sırasında tamamen R fazındadır. Malzemeye gerilme uygulandığında ilk akma, R fazı varyantlarının düzenlenmesi için gerekli deformasyonun başlangıcı olarak Y_R noktasında görülür. Y_R noktasına kadar martenzit tamamı ikizlerden oluşmaktadır.



Şekil. 5. Ti-at %50 Ni alaşımlı telin gerilme-uzama diyagramı [9].

Varyantların düzenlenmesinin sağlandığı bu ilk adım % 0,8 lik bir uzama görülür. Bu akma noktasından itibaren ikizlenme bozulmaya başlar, son yıllarda yapı çalışmaları göre ikizlenmenin bozulması iki farklı isim tanımlanmaktadır [12]. Bunlar, domino ve tetiklenmiş ikizlenme bozulmasıdır. Domino tipinde, ikizlenmede bozulma sabit yük altında kendi kendine oluşur. Tetiklenmiş ikizlenme bozulmasında ise dışarıdan yük uygulanması ile ikizlenmede bozulma meydana gelir. İkinci akma ise, Y_M noktasında görülür, bu nokta gerilmeye bağlı olarak R fazından B19' martenzit oluşmaya başlar. Bu aşamada malzemedeki uzama miktarı % 5 i bulmaktadır. Bundan sonra yük artırıldığında gerilme hızla artar ve kayma deformasyonu oluşur. Kayma ile ikizlenmedeki bozulma miktarı artmaya başlar, bozulma tamamen gerçekleştiği sonraki adımda ise dislokasyonlar oluşur. Son adımda malzeme yaklaşık % 15 lik uzamaya eriştiğinde kopma meydana gelir. Eğer, deney sıcaklığı M_s sıcaklığının altında ise ilk adımdaki akma görülmez, çünkü sistemde R fazı yoktur. Bu durumda B19' martenzit varyantlarının düzenlenmesine bağlı olarak büyük bir adım görülür. Eğer, deney sıcaklığı R_f 'nin üzerinde kayma başlamadan önce gerilmeye bağlı olarak B19' martenzitleri görülür.

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE SONUÇLAR

4.1. Döküm ve Hızlı Soğutma İşlemi

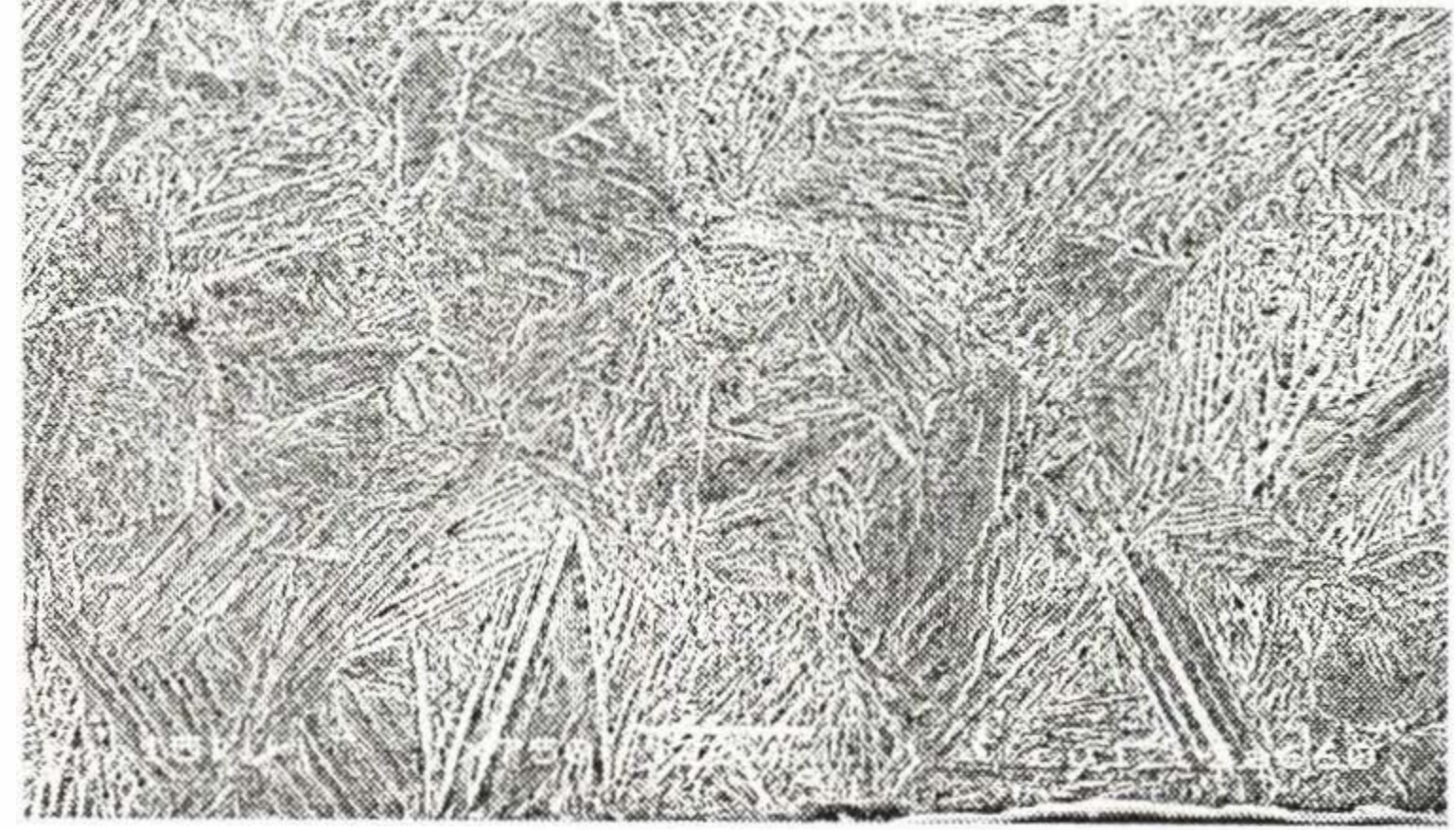
Bu çalışmaya esas olan Bakır-Aluminyum alaşımları şekil bellekli alaşımlarda istenen tek fazlı yapı olan β yapısını verecek olan ağırlıkça %10 dan % 14 e kadar olan bölgeden seçilmiştir. Döküm işlemi Leybold IS 1/III - DS marka vakum indüksiyon ocağında argon gazı basıncı altında gerçekleştirilmiştir. Döküm işlemini takiben istenen bileşimde elde edilen alaşımlar hızlı soğutma ile katılaştırılarak ince şeritler elde edilmiştir. Hızlı soğutma işlemi ile elde edilen şeritlerin şekil bellek etkisi gösterip göstermediklerini anlamamın en basit yolu Cu-Al alaşımları için hızlı soğutma işlemini takiben şeritlerin deforme edilip hemen arkadan ısıtılmasıdır. Bu yöntemle yapılan ilk kontrollerde en iyi şekil bellek özelliği gösteren alaşımın ağırlıkça % 12,2 Al, daha sonra % 12,5 Al içeren alaşımlar olduğu tesbit edilmiştir. Diğer alaşımlarda hızlı soğutma işlemi sonucunda şeritler deforme edilebilmelerine karşın iyi bir şekil belleği gözlenememiştir. % 14 Al içeren alaşım kırılğan karakterde olduğundan, fazla deformasyon yapılamamış, bu nedenle ŞBE gösterip göstermediği gözlenememiştir. Bu çalışmada en iyi ŞBE özelliği gösteren Cu-% 12,2 Al içeren şeridin Şekil.6 da ısıtma ile şekil değiştirmesi görülmektedir. Şekil.6 da önceden düz olarak şekil verilerek ısıtma işlemi yapılmış (training işlemi) alaşımın soğuk şekillendirme ile bükülmesi ve daha sonra ısıtmak suretiyle bükülmüş olan şeridin düzelmesi fotoğraflarla gösterilmektedir.

Hızlı soğutma işleminden sonra elde edilen şeritlerin mikroyapıları taramalı elektron mikroskopunda alınmıştır. Burada en iyi şekil bellek özelliği gösteren ağırlıkça % 12,2 Al içeren alaşımın ikincil elektron görüntüsü Şekil 7 de verilmektedir.

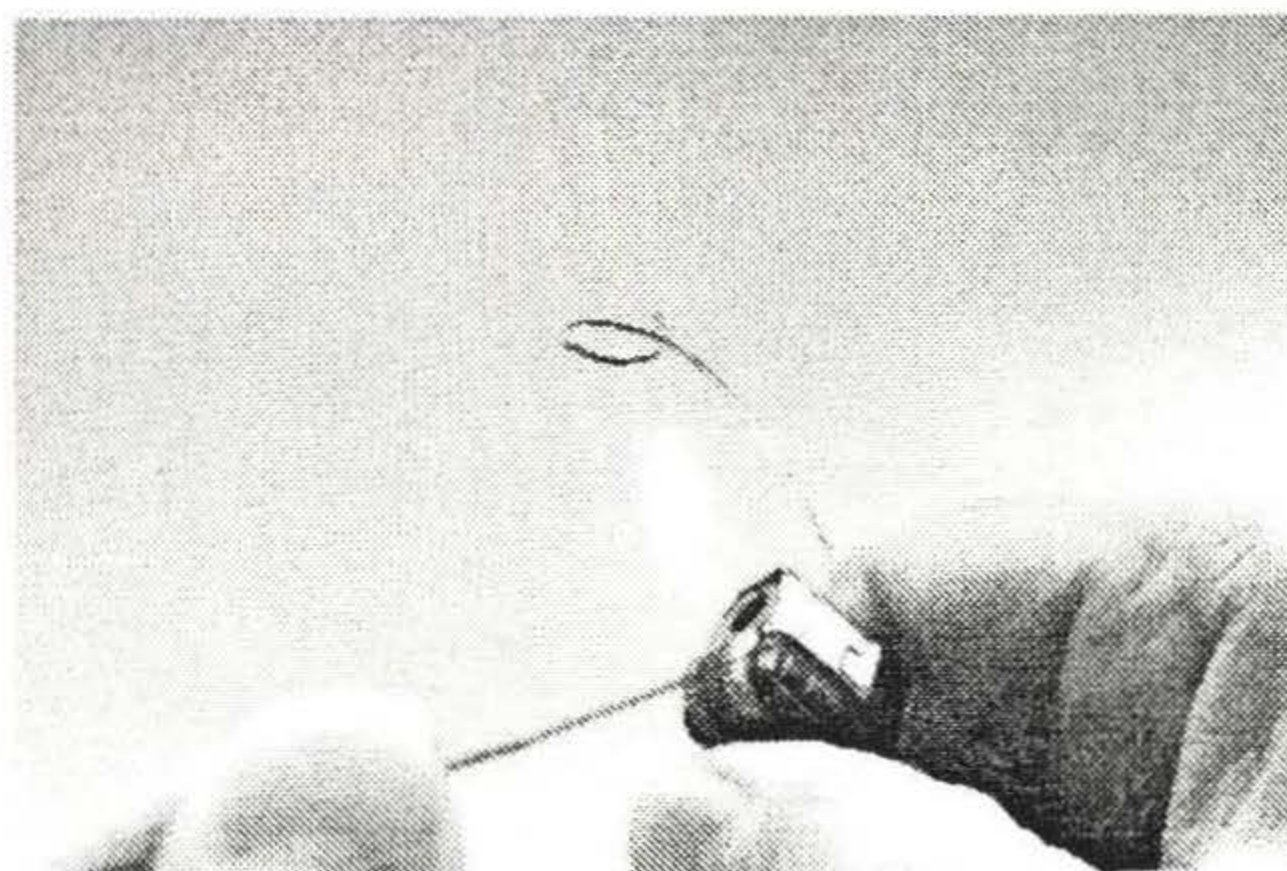
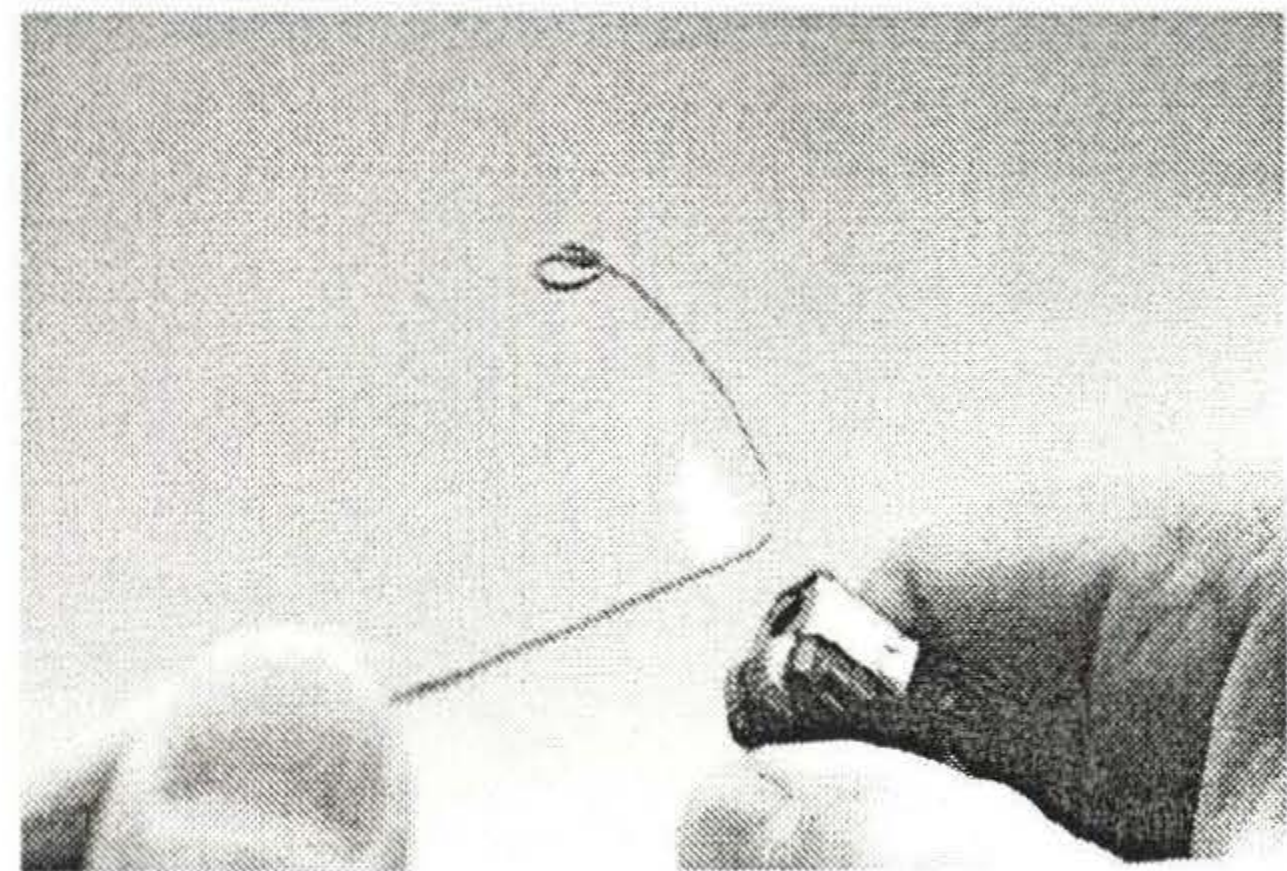
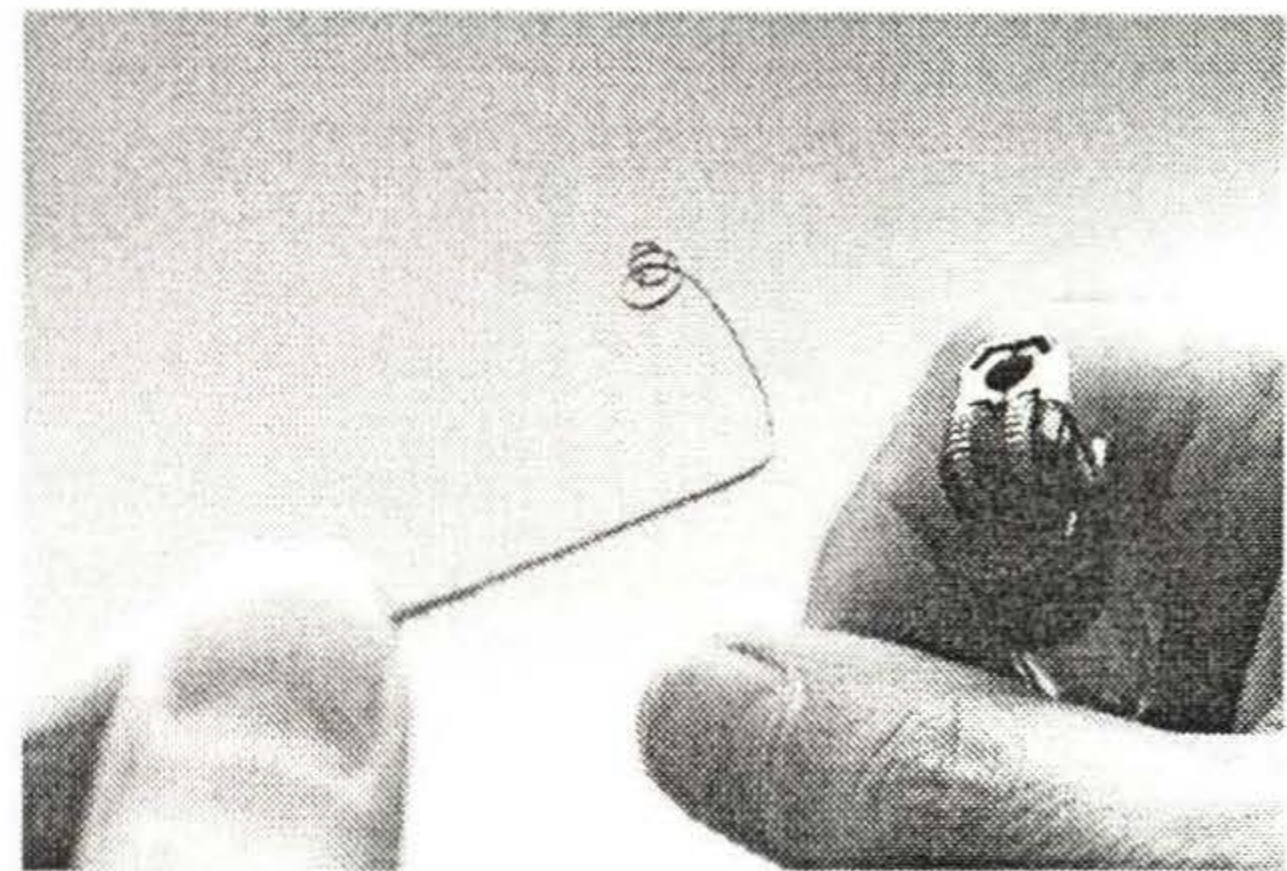
Mikroyapıların incelenmesinde % 12,2 ve 12,5 Al içeren alaşımların tek fazlı yapıda olduğu % 11,8 ve 14 Al içeren alaşımların ise iki fazlı yapıda olduğu görülmüştür. Ağırlıkça % 12,2 ve 12,5 Al içeren alaşımlar daha önce bahsedildiği üzere hızlı soğutmadan hemen sonra en iyi ŞBE gösteren alaşımlardır. Cu-Al faz diyagramı incelendiğinde bu bileşimdeki alaşımların katılma sırasında, katılma aralığının çok dar olduğu noktalardan katıldıkları görülmektedir. Faz diyagramında diğer alaşımların bileşim çizgilerine bakıldığında ise katılma aralığı nispeten daha geniş olan noktalardan geçtikleri görülmektedir. Bu durumda hızlı katılma sonucunda iki fazlı yapıya benzer yapılar elde edilmiştir.

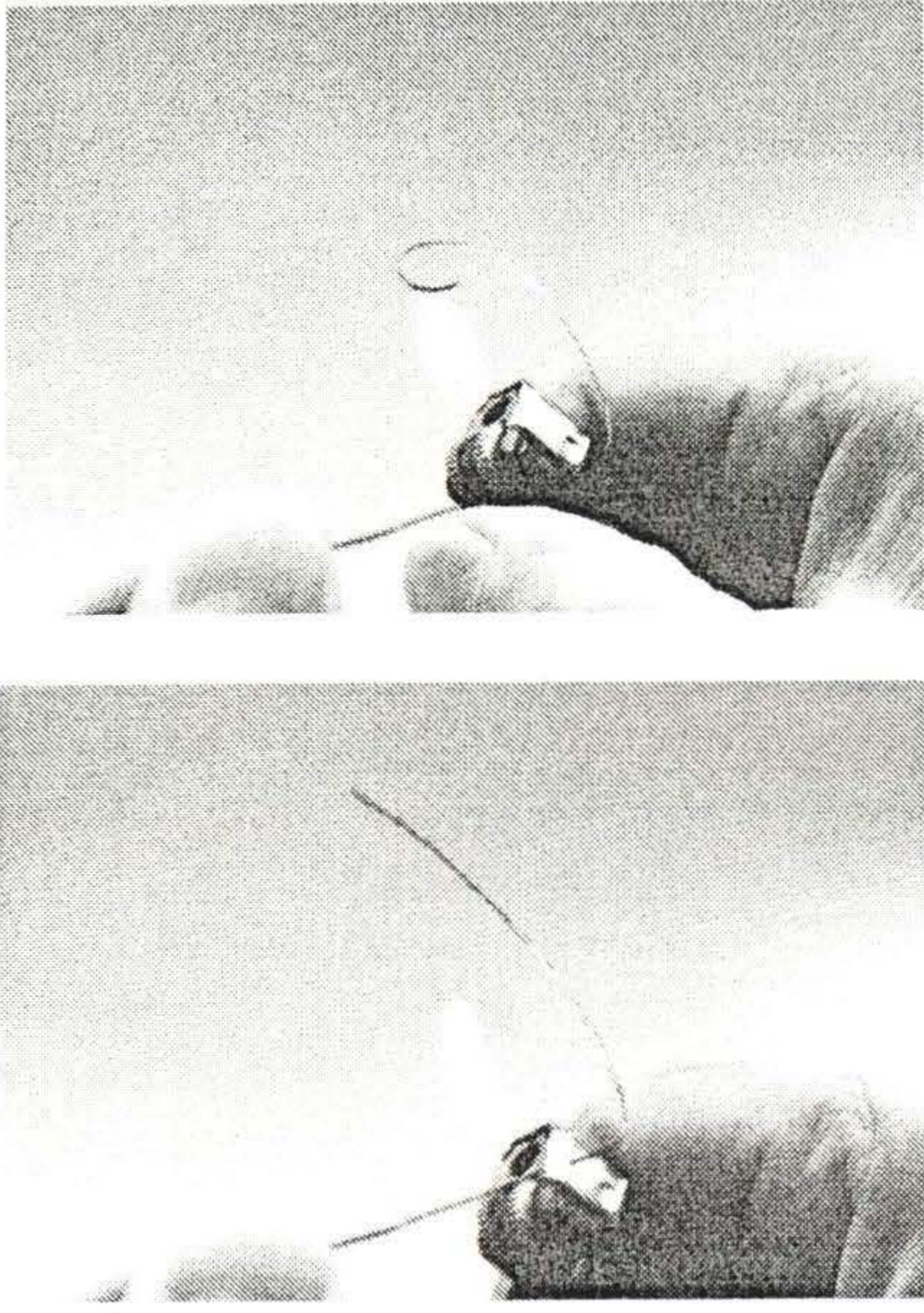
4.2. Çekme Deneyleri

Çekme deneylerine ait Gerilme-% Uzama diyagramları, hızlı soğutulmuş ve 660 °C de ısıtma işlemi yapılmış numunelerden oluşan ikili gruplar halinde % 11,8 Al, %12,2 Al, %12,5 Al içeren alaşımlar yapılmış, bunlardan en iyi özelliği gösteren ağırlıkça % 12,2 Al içeren alaşımın hızlı soğutulmuş ve ısıtma işlemi yapılmış şeritlerinin çekme deney sonuçları grafik olarak Şekil 8 ve Şekil 9 da verilmiştir.

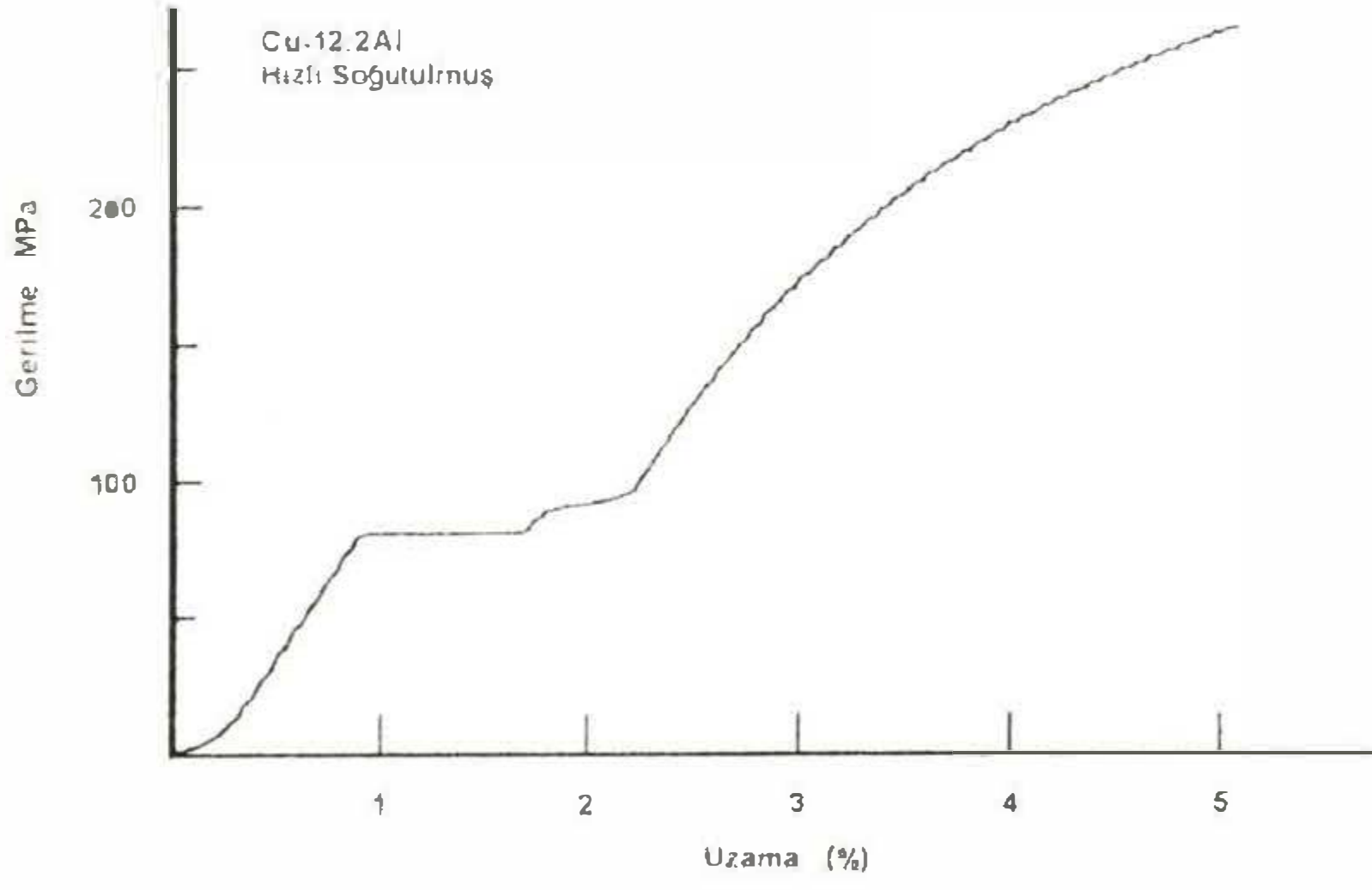


Şekil 7. Cu-ağ % 12,2 Al Alaşımının 660°C da ısıtma işlemi yapıldıktan sonra elde edilmiş SEM İkincil Elektron Görüntüsü [8]

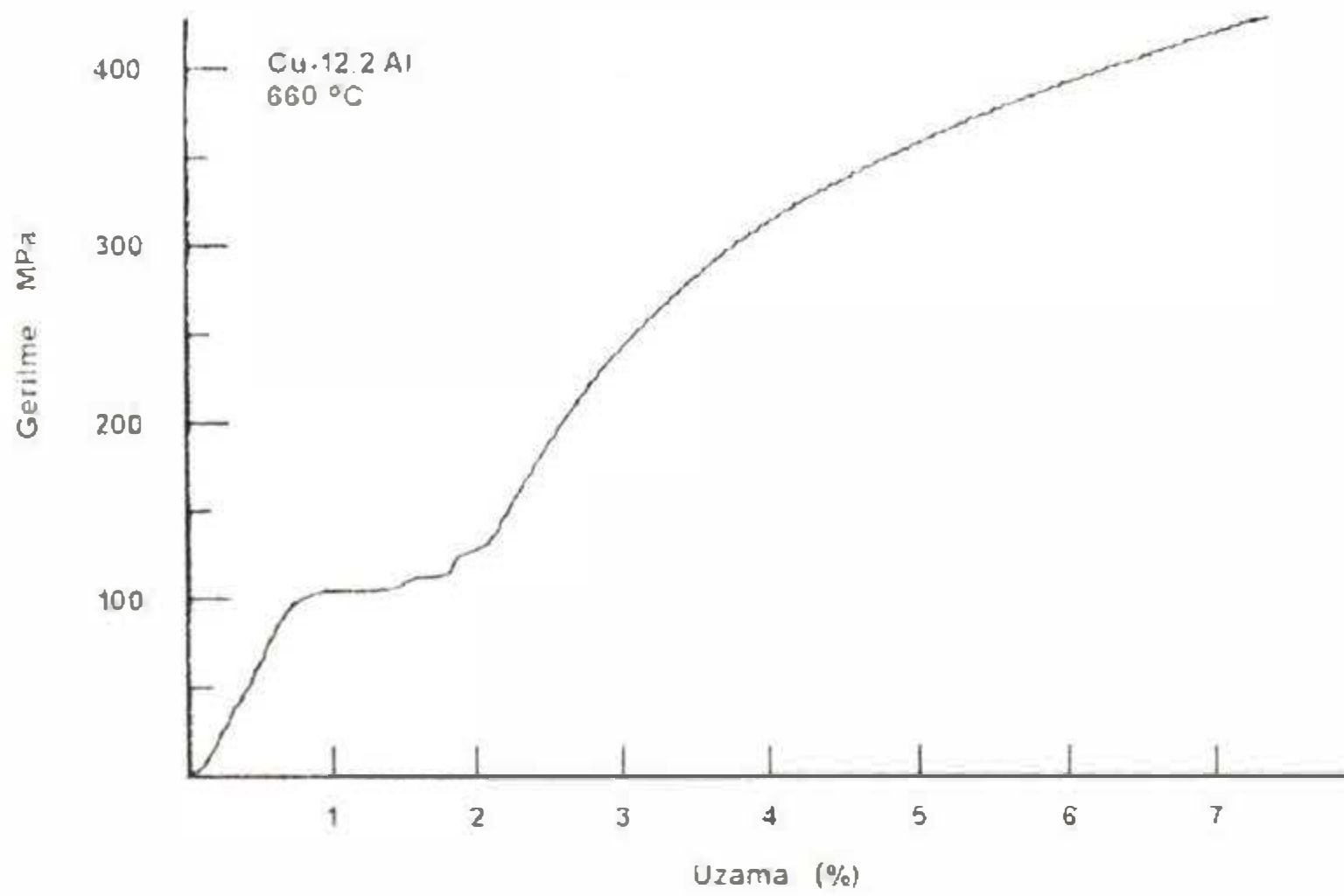




Şekil 6. Bu çalışmada üretilmiş olan ŞBA'm, düz şekil verilerek ısıtıl işlem yapılmış ve daha sonra soğuk şekillendirme ile bükülmüş şeridin ısıtma etkisiyle ilk haline dönüşü görülmektedir. [8]

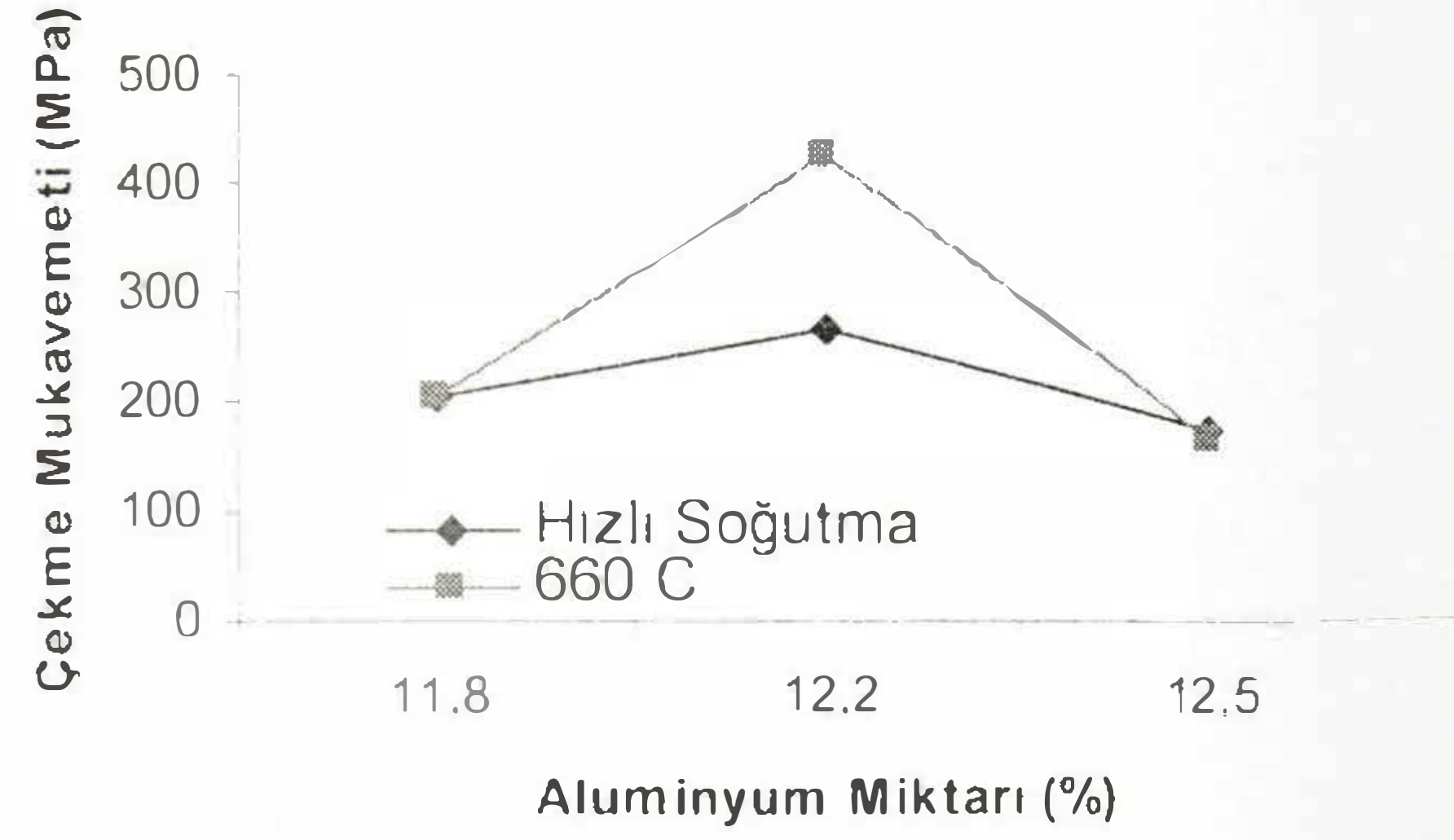


Şekil 8. Cu-%12.2 Al içeren hızlı soğutulmuş şeridin çekme deneyi eğrisi [8]



Şekil 9. Cu-%12.2 Al içeren 660°C de ısıtıl işlem yapılmış şeridin çekme deneyi eğrisi [8]

Elde edilen sonuçlardan çıkararak, alaşımların alüminyum içeriklerine bağlı olarak mukavemet değişim eğrisi çizildiğinde % 12,2 Al içeren Cu-Al alaşımının mukavemetinin diğer alaşımlara göre daha yüksek olduğu, bu özelliğin ısıtıl işlem yapıldıktan sonra artarak devam ettiği gözlenmektedir. Bu ilişki Şekil 10'da görülmektedir. En yüksek mukavemete ve uzama değerlerine sahip % 12,2 Al içeren şeridin uzama miktarı



Şekil 10. Hızlı soğutulmuş ve 660 °C da ısıtıl işlem yapılmış şeritler alüminyum miktarına bağlı olarak çekme mukavemeti değişimi [8]

hızlı soğutulmuş şeridin uzama miktarına göre % 45 'li artış gösterirken, mukavemetteki artış oranı ise % 60 geçmiştir. Buradan görüleceği üzere özelliklerde iyileşme % 12,2 Al içeren alaşımda çok iyidir. Diğer alaşımlarda mukavemet değerlerinde artış çok düşük olmasına rağmen uzama değerlerinde % 30'a varan iyileşmeler görülmüştür.

5. TARTIŞMA

Bu çalışmanın temel amacı, üzerinde birçok araştırma yapılmış, çok bileşenli Cu-Al-Ni esaslı ŞBA'ları temelini oluşturan ve üzerinde yayınlanmış detaylı çalışma bulamadığımız CuAl ikili alaşımlarından ilave bileşenli bir ŞBA üretebilmektir. Üretim yöntemi olarak da daha yeni bir teknik olan hızlı soğutma tekniğini kullanarak başka ilave bir işleme gerek kalmaksızın sıvı fazdan doğrudan martenzitik dönüşüm gösteren Cu_3Al fazını elde edebilmektir. Bu çalışma sonucunda bu amaçlar gerçekleştirilmiştir.

ŞBA'larda alaşımın ne kadar iyi ŞB özelliği gösterdiğini ölçütleri; o alaşımın elastik deformasyon [13] olarak isimlendirilen, martenzit fazında ne oranda deformasyon edilebildiği, bu deformasyondan sonra ilk haline geri dönüş oranı ve ayrıca bu çevrimlerin tekrar sayısıdır [14, 15, 16]. Bu çalışma ile elde edilen şeritlerin martenzit fazında iken deformasyonundan sonra ilk haline geri dönüş miktarı Şekil 6. da görüldüğü gibi rahatlıkla % 10

denebilir. Çünkü martenzit fazında iki kere sarılmış olan şerit ısıtma etkisi ile östenit fazına çıkarıldıktan sonra tamamen düz hale gelebilmektedir. Ghosh ve arkadaşları [15] tarafından yapılan çalışmada numuneler en fazla L şeklinde 90° bükülmüş halde deneye tabi tutulmuş, bunların sonucunda bazı CuAlNi alaşımlarında bileşime bağlı olarak şeklin geri dönüşü gerçekleşmez iken, bazı alaşımlarda kısmen, bazılarında tamamen şeklin geri dönüşü gerçekleşmiştir. Yapılan incelemelerde hızlı soğutulmuş halde ve ısıtma işlemi yapıldıktan sonra ağı. % 12,2 Al içeren alaşımın en iyi ŞB özelliği gösterdiği daha sonra ise % 12,5 Al içeren alaşımın ŞB özelliği gösterdiği görülmüştür. % 11,8 Al ve % 14 Al içeren hızlı soğutulmuş ve 660 °C de ısıtma işlemi görmüş şeritlerde zayıf şekil belleği gözlenmiştir. Bunun nedeni % 11,8 Al alaşımının Al içeriğinin düşük olması, % 14 Al içeren alaşımın ise ŞB özelliğine sahip Cu₃Al fazının yanı sıra kırılğan Cu₆Al₄ fazını içermesidir.

Mekanik testlerden çıkartılan sonuçlara göre, üretilen şeritlerin hepsi Suzuki Y. ve Liu Y. 'nın [7, 12] çalışmalarındaki karakteristik çekme deneyi eğrileri olarak tanımlanan çekme deneyi eğrileri ile karşılaştırıldığında, benzer karakteristik özellikleri sergilemiştir. Bu karakteristik özelliklere bakıldığında süresiz akma ve büyük Lüders uzamaları olduğu görülmektedir. Şekil 5.te Ti-Ni ŞBA'na ait tipik bir gerilme-% uzama diyagramı verilmektedir, bu diyagrama göre ilk akma Y_R noktasında başlar, bu akma noktasına kadar martenzit içindeki ikiz varyantları düzenlenir, bu arada uzama artarken gerilme de artmaktadır. Bu akma noktasından sonra ikizlenme bozulmaya başlar. İkinci akma noktası Y_{N1} de görülür, burada malzemedeki ikizlenmenin bozulma miktarı hızla artar ve artık kayma deformasyonu oluşmaya başlar. Kayma etkisi ile ikizlenmenin tamamen bozulmasından sonra dislokasyonlar oluşur ve nihai uzamaya ulaşıldığında kopma meydana gelir.

Şekil 8 ve Şekil 9.da bu çalışma çerçevesinde üretilen ağı. % 12,2 Al içeren alaşımın hızlı soğutulmuş ve 660 °C da ısıtma işlemi yapılmış şeritlerinin çekme deneyi sonucu elde edilen Gerilme-% uzama diyagramlarını görmekteyiz. Bu diyagramlarda Y_R noktasına karşılık gelen akma bölgesinde DO₃ yapısındaki β_1 , 18R₁ yapısındaki β_1' ne dönüşmekte, Y_{N1} akma noktasına karşılık gelen bölgede ise β_1' - 6R yapısındaki α_1' e dönüşmekte [6, 16], bu arada oluşan akma bariz olarak görülmektedir. Bu akmalar, Şekil.8 ve 9 da verilen şekillerde uzamanın olduğu, fakat gerilmenin değişmediği iki plato şeklinde görülmektedir.

%12,2 Al içeren Cu-Al alaşımı mekanik özellikler bakımından diğer alaşımlara nazaran daha iyi bulunmuştur. ısıtma işlemi yapıldıktan sonra ise özelliklerde

örneğin uzama miktarında hızlı soğutulmuş şeritlere oranla % 45 lik artış elde edilirken, mukavemette % 60 lik bir artış gözlenmiştir. Diğer alaşımlarda ise mukavemet değerleri hızlı soğutulmuş şeritlere nazaran farklılık göstermezken, uzama miktarlarında iyileşmeler görülmüştür. Bu çalışma ile elde edilen % 12,2 Al içeren alaşımın hızlı soğutulmuş halde 260 MPa civarında olan çekme mukavemetinin ısıtma işlemi yapıldıktan sonra 427 MPa seviyelerine yükseldiği gözlenmiştir. CuZnAl alaşımlarında 400–700 MPa, CuAlNi alaşımlarında 500–800 MPa civarında [17] olan çekme mukavemet değerleri ile karşılaştırıldığında ikili alaşım için bu değer hiç de azımsanmayacak bir mertebede sayılabilir. CuZnAl alaşımlarında % 10–15, CuAlNi alaşımlarında % 4–12 gibi bir aralık içinde olan uzama değerleri açısından bakıldığında ise bu çalışmada elde edilen % 12,2 Al içeren alaşımdaki % 5-7,5 arasındaki uzama miktarı için iyi bir değer denebilir.

Yukarıda sözü edilen bu çalışma sadece ikili Cu-Al alaşımı üzerinde yapılmış, dönüşüm sıcaklıklarının istenildiği gibi kontrol edilebilmesi, kararlılık problemlerinin en aza indirilmesi, dönüşüm sıcaklığının belli bir aralıkta tutulabilmesi için Ti, Zr, Hf ve Be gibi elementlerin ilavesi ile konu üzerinde çalışmalar devam etmektedir. Ayrıca çevrim sayısının tespiti için mekanik deneyler de ileride yapılacak çalışmalar kapsamındadır.

KAYNAKLAR

- [1]. Aydogdu A., Aydogdu Y., Adiguzel O., "Long-term ageing behaviour of martensite in shape memory Cu–Al–Ni alloys", *Journal of Materials Processing Technology* 153–154 (2004) 164–169
- [2]. Hodgson D.E., Wu M.H. ve Biermann R.J., *Metals Handbook, Vol.2, 10th Edition, Nov.1990*
- [3]. Srinivasan A.V., McFarland D.M., *Smart Structures "Analysis and Design"*, Cambridge University Press, 2001, Ch 3, pp 26-34
- [4]. R. Gastien a., C.E. Corbellani a. M. Sade b, F.C. Lovey, "Thermal and pseudoelastic cycling in Cu–14.1Al–4.2Ni (wt%) single crystals", *Acta Materialia* 53 (2005) 1685–1691
- [5]. Barnes Clive, *Copper Development Association*, New York, A.B.D., CDA yayımları websitesi, www.copper.org/technology/1997/07_shape.html
- [6]. Otsuka K. ve Wayman C.M. "Mechanism of Shape Memory Effect and Superelasticity" *Shape Memory Materials*, Cambridge University Pres, 1999, Ch.2, pp 27-48
- [7]. Suzuki Y. "Fabrication of Shape Memory Alloys", *Shape Memory Materials*, Cambridge University Pres, 1999, Ch.6, pp 133-148

- [8]. Baksan B., "Bakır Alüminyum Alaşımlarından Hızlı Soğutma Yöntemi ile Şekil Bellekli Malzeme Üretimi", Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Mart 2004
- [9]. Saburi T. "Ti-Ni Shape Memory Alloys" Shape Memory Materials, Cambridge University Pres, 1999, Ch.3, pp 49-96
- [10]. Tadaki T. "Cu-based Shape Memory Alloys" Shape Memory Materials, Cambridge University Pres, 1999, Ch.4, pp 97-116
- [11]. Larochette P. Arneodo, Ahlers M., "Grain-size dependence of the two-way shape memory effect obtained by stabilisation in Cu-Zn-Al crystals", Materials Science and Engineering A361 (2003) 249-257
- [12]. Liu Yong, "Detwinning process and its anisotropy in shape memory alloys", Smart Materials, Proceedings of SPIE, Vol. 4234, pp 82-93, 2001
- [13]. Otsuka K. ve Shimizu K., "Memory Effect and Thermoelastic Martensite Transformation in Cu-Al-Ni Alloy", Scripta Metallurgica, Vol.4, pp.46-472, 1970
- [14]. Sugimoto K., "Recent Development in Copper Based Shape Memory Alloys", Proc. 1st. Jap International SAMPE Symposium, Nov.28-Dec 1989, pp.219-224.
- [15]. Ghosh B., Banerjee M.K., Seal A.K., "Shape Memory in Some Copper Alloys", Materials Science and Technology, May 1986, Vol.2, 496-499
- [16]. Perkins J., "Shape Memory Behavior and Thermoelastic Martensitic Transformation", Materials Science and Engineering, 51 (1981), 181-192
- [17]. Humbeeck J.Van, Stalmans R. "Characteristics of Shape Memory Alloys", Shape Memory Materials, Cambridge University Pres, 1999, Ch.7, pp 14-183