

A. Erol Selimbeyoğlu
Makina Grubu
Kara Harp Okulu
ANKARA

Ö. Gündüz Bilir
Profesör
Makina Mühendisliği Bölümü
Orta Doğu Teknik Üniversitesi
06531 ANKARA

Şekil-bellekli Tel ve Yay Üretimi

Bu çalışmada Cu-Zn-Al alaşım sisteminden oluşan şekil-bellekli tel ve yayların üretimi açıklanmıştır. Elde edilen tellerin mekanik özellikleri çekme ve sertlik deneyleri ile belirlenmiştir. Ayrıca şekil-bellek davranışının uygulamalarına ait örnekler verilmiştir.

GİRİŞ

Şekil-bellek etkisi son yıllarda büyük önem kazanmıştır [1-5]. Şekil-bellekli alaşımlar belirli bir sıcaklıkta plastik deformasyona uğratıldıklarından sonra, yükün kaldırılmasıyla veya daha yüksek bir sıcaklığa ısıtıldıklarında tamamen geri hareketle ilk şekillerini alırlar. Bu davranış temel olarak termoelastik martenzitik faz dönüşümünün bir sonucudur.

Termoelastik martenzitik dönüşümde martenzit plakaları sıcaklık azaldıkça sürekli olarak oluşur ve büyür ve sıcaklık arttığında aynı yolu izleyerek küçülür ve kaybolur.

Gerilme uygulanmadığında, martenzitler soğutma sırasında M_s olarak adlandırılan sıcaklıkta oluşmaya başlar ve daha düşük bir sıcaklık olan M_f 'de martenzit oluşumu tamamlanır. Ters dönüşüm A_s sıcaklığında başlar ve A_f sıcaklığında son bulur.

Ticari uygulamalarda kullanılan en uygun iki alaşım Ni-Ti ve Cu-Zn-Al alaşımlarıdır.

ŞEKİL BELLEKLİ TEL VE YAY ÜRETİMİ

Malzemeler

Alaşımlar, % 99.9 saflıktaki bakır, çinko ve alüminyumdan hazırlanmıştır.

Ergitme

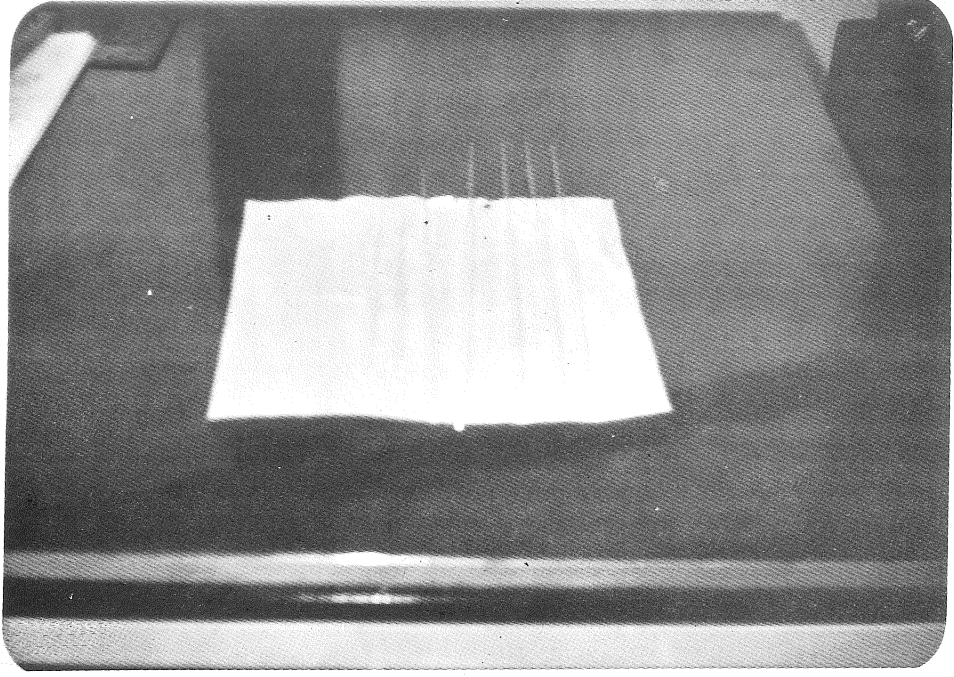
Malzemeler, yağ ve oksit miktarını en aza indirmek amacı ile trikloro etilen yağı ile temizlenmiş, asitle yüzeydeki oksit tabakası alındıktan sonra alkolle yıkanmıştır. Malzemeler 0.01 gram hassasiyetle bir

terazide tartıldıktan sonra, 50 gr alaşım oluşturmak amacı ile 12 mm dış çapında 1.2 mm et kalınlığındaki kuartz cam tüpler içine yerleştirilmiştir (Şekil 1). Kapatma işleminden önce, tüplerin havası vakum pompası ile alınmış, absorbe edilmiş suyu atmak için vakumlama işlemi sırasında oksijen-asetilen alevi ile tüp ısıtılmıştır. Daha sonra tüp 0.5 atmosfer basıncındaki argon gazı ile doldurulmuştur (Şekil 2 ve 3). Kapatma işleminden sonra tüp grafit koruyucu içerisine yerleştirilmiştir (Şekil 4). Grafit koruyucuyu hazırlamak için bir grafit parçası işlenerek içerisine tüpün gireceği şekilde bir tarafı kapalı bir delik açılmıştır. Tüpün grafit koruyucu içerisine yerleştirilmesinden sonra, grafit koruyucu elektrik dirençli ısıtma fırını içerisine yerleştirilerek 1100°C'de 20 dakika bekletilmiştir. Isıtma sırasında karışımın iyi karışması amacıyla ergimiş alaşım 5 dakikalık aralıklarla çalkalanmıştır (Şekil 5). Bu işlemden sonra, ergimiş alaşım fırından çıkarılarak havada soğutulmuştur.

Kuartz cam tüplerin SAGE şekillendirilmesi ve vakumlama işlemi Hacettepe Üniversitesi Kimya Mühendisliği Bölümünde gerçekleştirilmiştir. Grafitlerin ergitme işlemi ODTÜ Metallurji Mühendisliği Bölümünde yapılmıştır.

Kompozisyon

Alaşım Madde 2.2'de belirtildiği şekilde uygun miktarda bakır, çinko ve alüminyumdan oluşmaktadır. Seçilen kompozisyonlar 750°C üzerinde β fazının oluşmasına neden olmaktadır. Şekil 6, ağırlıkça % 4 alüminyum da Cu-Zn-Al üçlü faz diyagramının dik kesitini göstermektedir. Üçlü faz diyagramı incelendiğinde β fazının varlığının sıcaklığa bağlı



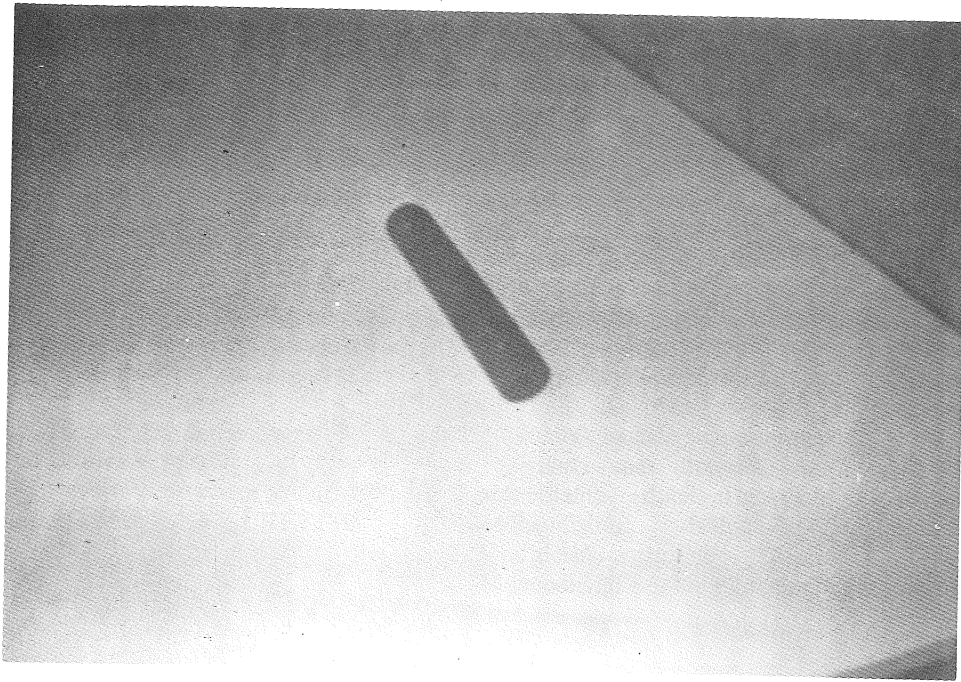
Şekil 1.



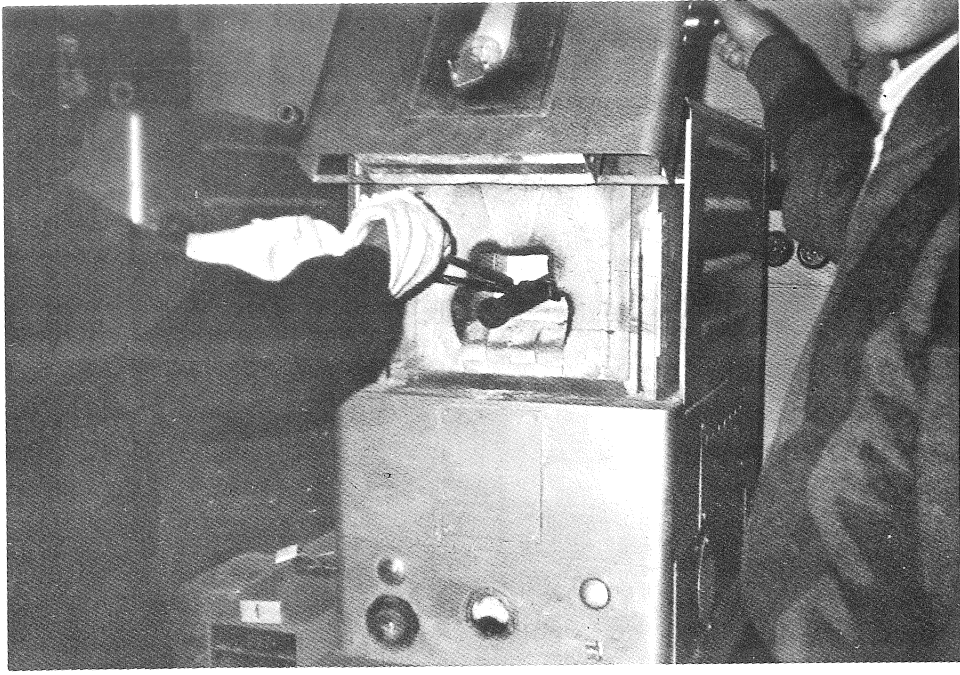
Şekil 2.



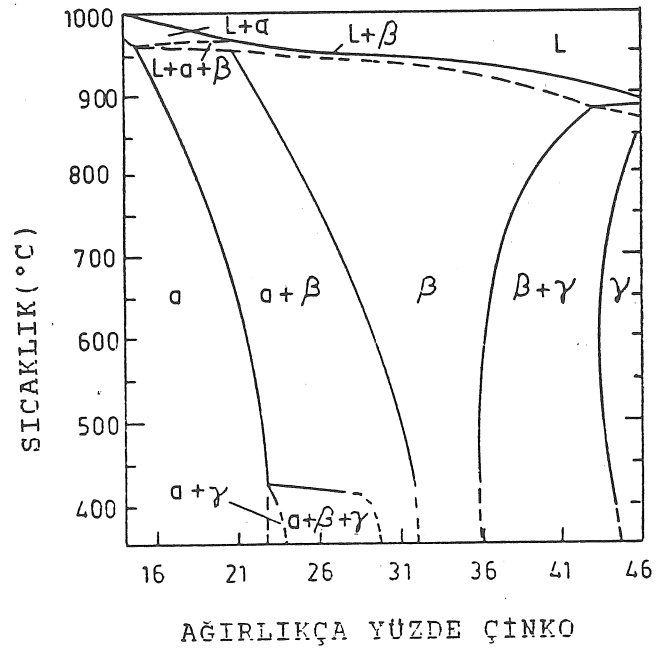
Şekil 3.



Şekil 4.



Şekil 5.



Şekil 6.

olduğu görülmektedir. Belirli bir kompozisyonda β fazının oluşup oluşmaması sistemin sıcaklığına bağlıdır. Deneysel program için az miktarda alüminyum eklenmiş iki Cu-Zn esaslı alaşım hazırlanmıştır. Alaşımlar ve kritik sıcaklıkları Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Alaşımların Kompozisyonları ve Kritik Sıcaklıkları

Alaşım	Cu (%)	Zn (%)	Al (%)	A _s (°C)	A _f (°C)
1.	68.03	28.12	3.10	57	103
2.	71.90	22.41	5.69	67	93

Alaşımların martenzitik dönüşüm sıcaklıkları oda sıcaklığına yakın olacak şekilde ve 750°C üzerinde β fazı oluşacak şekilde belirlenmiştir.

Homojenizasyon

Çubuk şeklindeki döküm parçalar, yapıyı homojenize etmek amacıyla argon atmosferi altında 72 saat süreyle 820°C'de ısıtılma tabi tutulmuştur. Bu amaçla Şekil 7'de görülen argon kontrollü fırın hazırlanmış ve parçalar içine yerleştirilmiştir. Alaşımlar fırından çıkarıldıktan sonra su içine atılmıştır. Homojenizasyon işlemi için 820°C sıcaklık seçilmesinin nedeni β fazının oluşumunu garanti etmek içindir. Çünkü şekil bellekli alaşımlardaki martenzit sadece β fazından oluşur.

Homojenizasyon işleminden sonra alaşımların kimyasal analizi yapılmıştır.

Homojenizasyon işlemi ODTÜ Metallurji Mühendisliği Bölümünde ve kimyasal analiz ise KOSGEB'de yapılmıştır.

Cu-Zn-Al Tellerinin Oluşturulması Yöntemi

Homojenizasyon işleminden sonra, alaşımlar 850°C'de yarım saat bekletildikten sonra haddede 8 mm çapında çubuk haline getirilmiştir. Uygun sıcaklıkta sıcak haddelene yapabilmek amacıyla elektrik direnç fırını haddenin yanına yerleştirilmiştir (Şekil 8). Alaşım 850°C'de fırından çıkartılmış ve haddelenmiştir (Şekil 9). Haddeden geçin çubuk beklemeksizin suya atılmıştır.

8 mm çapında çubuklar oda sıcaklığında haddelenerek daha küçük çaplara indirilmiştir. Daha küçük çaplara indirme işlemi haddelene işlemleri arasında ara ısıtılma işlemleriyle sağlanmıştır. Ara ısıtılma işlemi deformasyonu kolay olan ($\alpha + \beta$) fazını oluşturmak için yapılmıştır.

Haddeden çıkarılan tellerin kesitleri tam kare olmadığından, tellere yuvarlak şekil Şekil 10'da görülen palanga sistemi ve değişik çapta delikleri olan çelik plaka yardımıyla verilmiştir.

Cu-Zn-Al alaşımlarında yalnız α fazı soğuk işlem

bakımından oldukça iyidir. Bununla beraber β fazının bulunuşu soğuk işleme özelliğini zayıflatır. Şekil 6'da belirtilen alaşımda olduğu gibi, bu çalışmadaki alaşımlar 450°C ile 650°C arasında % 20'den fazla β fazı içermelidir. Bu nedenle çapta fazla düşme yapmak amacıyla alaşımlara birçok ara ısıtılma işlemleri uygulanmıştır. Şekil 6'dan görüldüğü gibi, alaşımlar 400°C'nin altında ($\alpha + \beta + \gamma$) fazlarına ayrışır. γ 'nın bulunuşu malzemenin işlenebilirliği açısından zararlıdır. Bu nedenle 500°C'deki ısıtılma işleminden sonra teller 450°C kadar fırında soğutulmuş ve daha sonra havada soğutulmuştur. Yüksek ısıtılma işlemi sıcaklıkları çinkonun buharlaşmasına ve β fazı içindeki α tanelerinin büyümesine neden olmaktadır. Diğer taraftan düşük ısıtılma işlemi sıcaklığı γ çökeltisi veya çubuk veya plaka şeklinde α yapısının oluşmasına neden olmaktadır.

Sıcaklık-deformasyon-zaman işlemi Şekil 11'de görülmektedir. Önce çubuklar yaklaşık 800°C'de sıcak olarak haddelendikten sonra suya atılır.

Şekil Bellekli Tel ve Yaylar

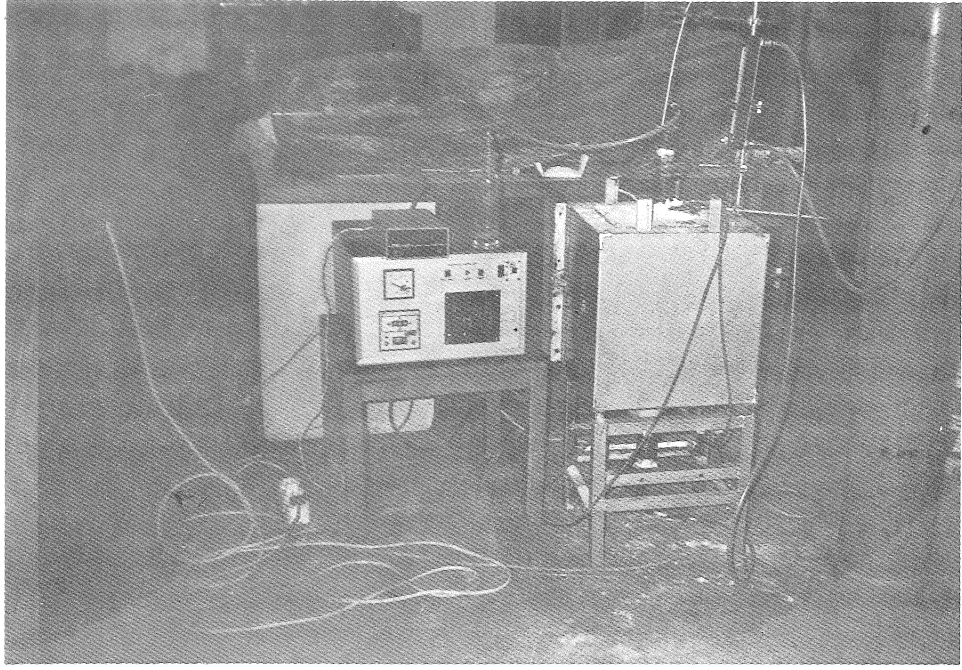
Oluşturulan iki fazlı ($\alpha + \beta$) Cu-Zn-Al telleri yay şekil verme işlemine veya şekil bellek davranışı kazandırmak üzere doğrudan ısıtılma işlemine tabi tutulmuştur (Şekil 12). Tellerden helisel yay yapma işlemi oda sıcaklığında torna yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Yay yapma işleminden önce tellerin işlenebilirliğini iyileştirmek için tellere ısıtılma işlemi uygulanmıştır. Bu işlemlerden sonra yaylar ve/veya teller 820°C'de 5 dakika ısıtıldıktan sonra suya atılmış ve suda 15 dakika süre ile bekletilmiştir.

Sudan çıkarılan teller ve yaylar tek-yönlü şekil-bellek etkisi kazanmış durumdadırlar. Tel veya yaylara herhangi bir şekilde kuvvet uygulanıp şekil değişikliğine uğratıldıktan sonra yapılan ısıtılma işlemi ile tel ve yaylar ilk konumlarına dönmektedirler. Tel ve yayların ilk konumu 820°C'de 5 dakika bekletilip suya atıldıktan sonra sudan çıkarılan konumudur.

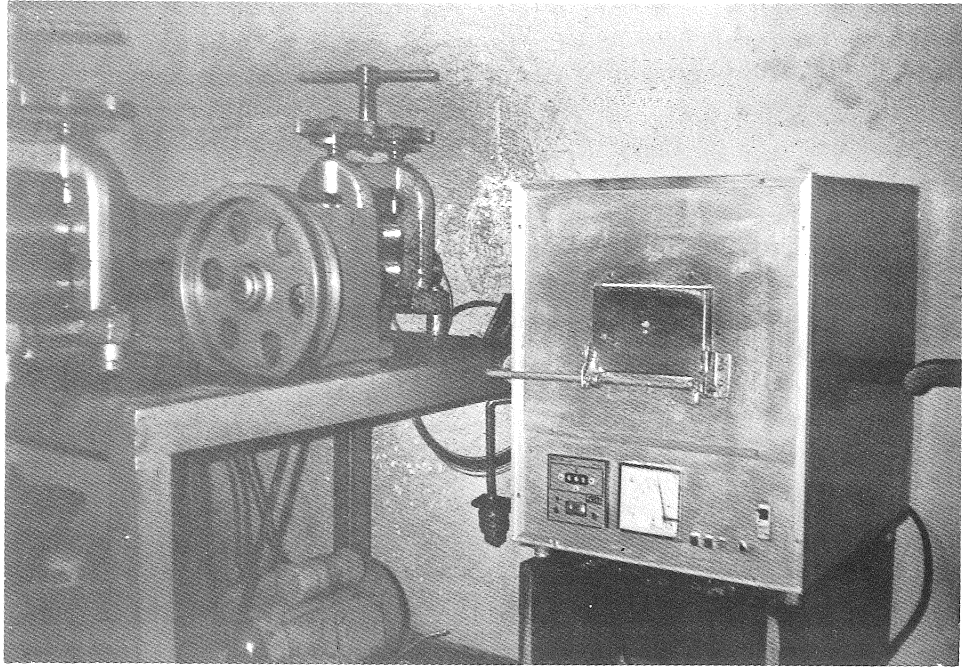
ÇEKME DENEYİ

Çekme deneyi, ısıtılma işlemi sonunda numunelerin ilk şekillerini alıp almadıklarını görmek amacıyla yapılmıştır. Yükleme sırasında yük-uzama diagramı çizdirilmiştir (Şekil 13). Numuneler başlangıçta martenzitik yapıya sahiptirler. Bu nedenle; martenzitik ve ana faz arasındaki sınır veya iç ikizler gibi hareketli kafes hataları başlangıçta hazır olduklarından çok düşük yük seviyelerinde (15 - 25 N) plastik deformasyona neden olurlar ve ana fazla karşılaştırıldığında elastik deformasyon bölgesi küçülmüştür. Deformasyon başlangıçta hazır bulunan martenzit tabakalarının yeniden yönelmesine neden olur ve uygun yönelmiş olanlar uygun yönelmemiş olanların aleyhine büyür. Yükün kaldırılması sonucu kalıcı bir şekil değişikliği görülür. Numuneler ısıtıldıklarında kalıcı şekil değişikliği yok olur ve numuneler tamamen ilk konumlarını alırlar.

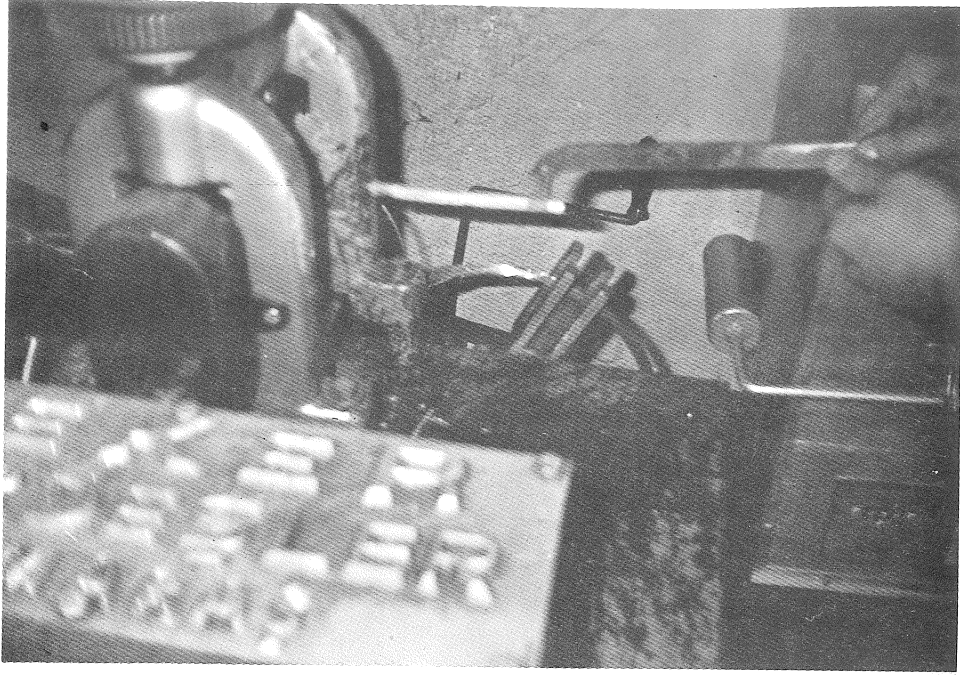
İki özellik oldukça önemlidir. Birincisi, 300 N yük



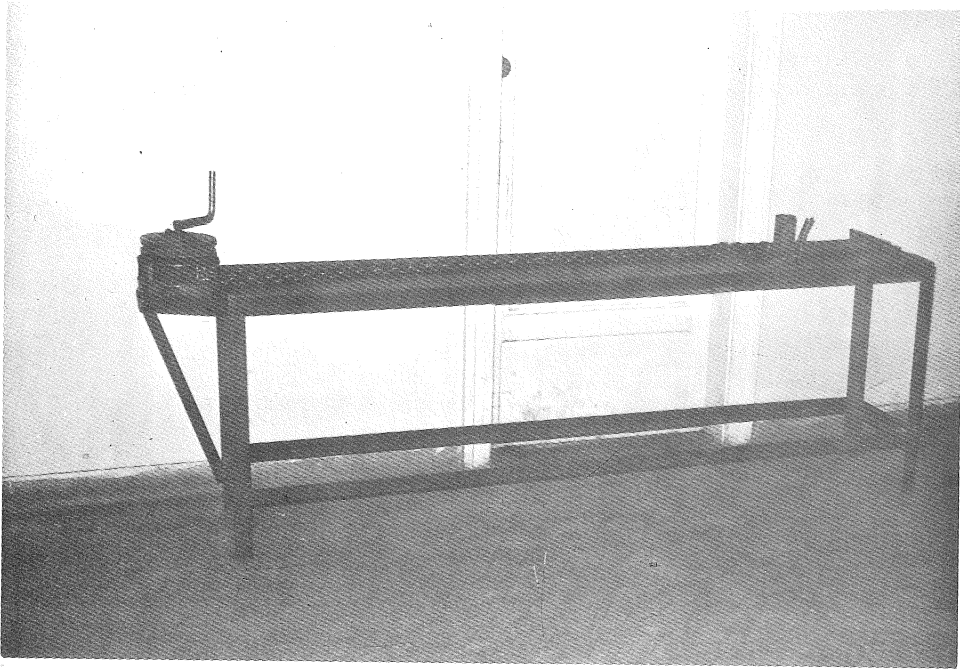
Şekil 7.



Şekil 8.



Şekil 9.



Şekil 10.

Tablo 2. Alaşımların Sertlik Deney Sonuçları.

Numunelerin Durumu	Knoop Sertliği	Brinell Sertlik	Rockwell Sertliği
Dökümden sonra (alaşım 2)	164.45	130	80
Homojenizasyondan sonra (alaşım 2)	177.85	140	84
Birinci ara ısıtıl işleminden sonra (alaşım 2)	128.85	102	65
İkinci ara ısıtıl işleminden sonra (alaşım 2)	123.50	98	62
Üçüncü ara ısıtıl işleminden sonra (alaşım 2)	149.70	120	75
Dördüncü ara ısıtıl işleminden sonra (alaşım 2)	155.35	124	77
Beşinci ara ısıtıl işleminden sonra (alaşım 2)	181.45	142	85
Suya attıktan sonra (alaşım 2)	187.10	148	87
Suya attıktan sonra (alaşım 1)	219.60	171	94

altında deformasyona maruz bırakılan numunede ısıtılma sonucunda numune tamamen ilk konumuna dönmektedir. İkincisi, martenzitik yapıda akma yükü oldukça düşüktür. Gerçekte şekil-bellekli alaşımlarda, martenzitin akma gerilmesi ana fazın akma gerilmesi değerinin % 10'u kadardır. Genellikle şekil-bellekli alaşımların tasarımı tasarımların gerilmesi olarak ana fazın akma gerilmesi alınır.

SERTLİK DENEYİ

Alaşımların sertlik deney sonuçları Tablo 2'de görülmektedir. Sertlik deneyleri oda sıcaklığında yapılmıştır.

İki numaralı alaşımın sertlik değeri; sırasıyla döküm, ısıtıl işlem, çekme ve suya atma işlemlerinden sonra ölçülmüştür. Diğer alaşımın sertlik değeri suya atma işleminden sonra belirlenmiştir.

Sertlik değerleri Knoop sertliği, Brinell sertlik ve Rockwell B sertliği olarak üç değişik şekilde verilmektedir.

Şekil-bellekli alaşımların deformasyon karakteristikleri o şekildedir ki gerçekte oldukça kırılğan olan ana faz yapısındaki malzeme martenzitik yapıya dönüştürülerek yumuşak bir hale getirilebilir.

Sertlik değerlerinin incelenmesinde iki numaralı alaşımın sertlik değerinin döküm işleminden sonra 80 HRB olduğu görülmektedir. Dökümden sonraki ısıtıl işlemi sertlik değerinin 84 HRB'ye çıkmasına neden olmuştur. İlk iki ısıtıl işleminden sonra sertlik değerinde düşme görülmektedir (65 HRB ve 62 HRB). Fakat daha sonraki iki ısıtıl işlemde sertlik değerinde artışlar

görülmekte ve 85 HRB'ye ulaşan bir sertlik değeri elde edilmektedir. Alaşım suya atıldığında sertlik değeri kısmen artarak 87 HRB'ye ulaşmaktadır.

Bir numaralı alaşımın su verme işleminden sonraki sertlik değerleri 94 HRB'dir.

ŞEKİL-BELLEK DAVRANIŞININ UYGULAMALARI

Uygulamalar iki esas parametrenin avantajı ile ortaya çıkmaktadır; belirli bir sıcaklık aralığında ısıtılma sonucu oluşan şekil değişikliği ve ısıtılma sonucu geriye dönüşün engellenmesiyle oluşan iç gerilmeler.

Şekil-bellekli alaşımların kullanımını, endüstriyel [1, 3, 4, 6, 7-10] enerji [1, 11] ve dental-medikal [1, 4, 12-14] olmak üzere üç kategoride değerlendirebiliriz.

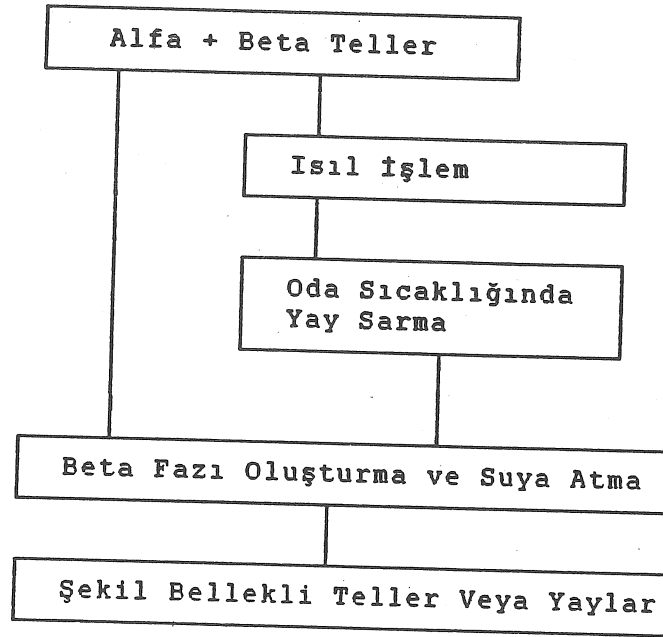
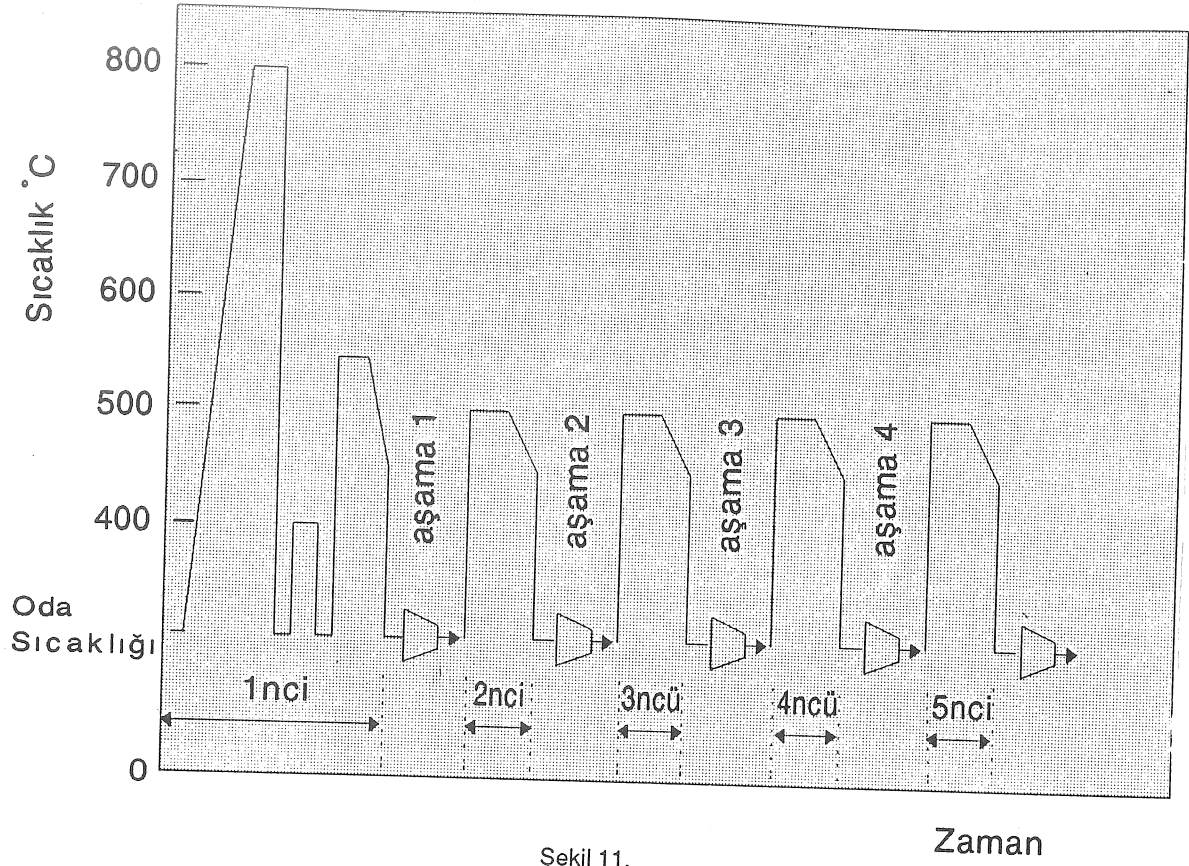
Uygulamalardan bazıları aşağıda açıklanmıştır.

İçten Yanmalı Motorlarda Bulunan Karbüratörler İçin Yakıt Enjeksiyon Lüləsi

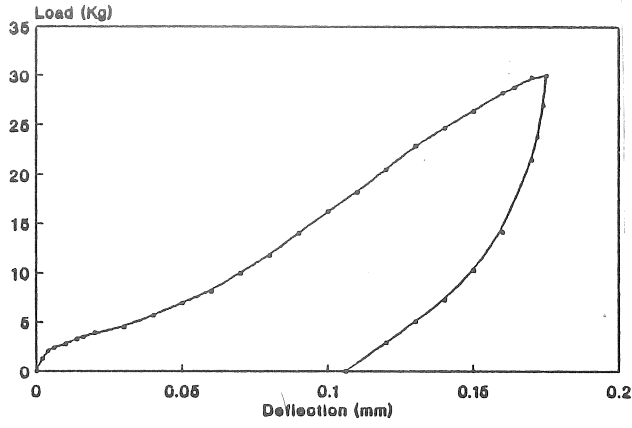
Lüle çıkışının etkili çapı bir şekil-bellek etkisi gösteren eleman kullanımıyla lüle sıcaklığına göre otomatik olarak kontrol edilir (Şekil 14). Bu şekilde, yakıt vizkozitesine göre ayarlama yaparak atmosfer kirliliği azaltılır ve yakıt tüketimi optimize edilir. Sıcaklık arttığında lüle çıkış çapı düşürülür, sıcaklık azaldığında lüle çıkış çapı büyütülür.

Termostatik Kavramalı Soğutma Fanı

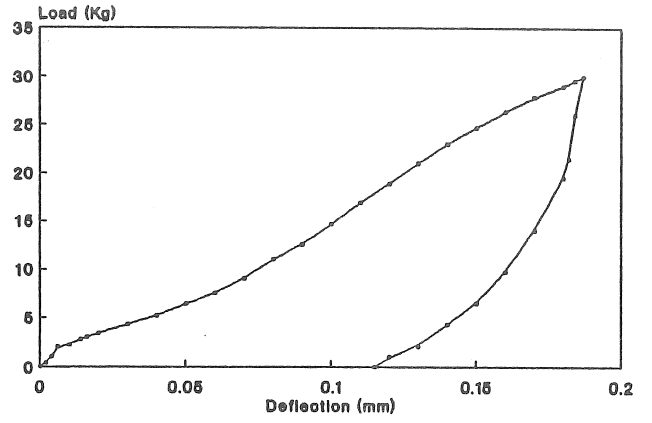
Bu ürün (Şekil 15) otomobillerin ve ticari taşıtların



Şekil 12.

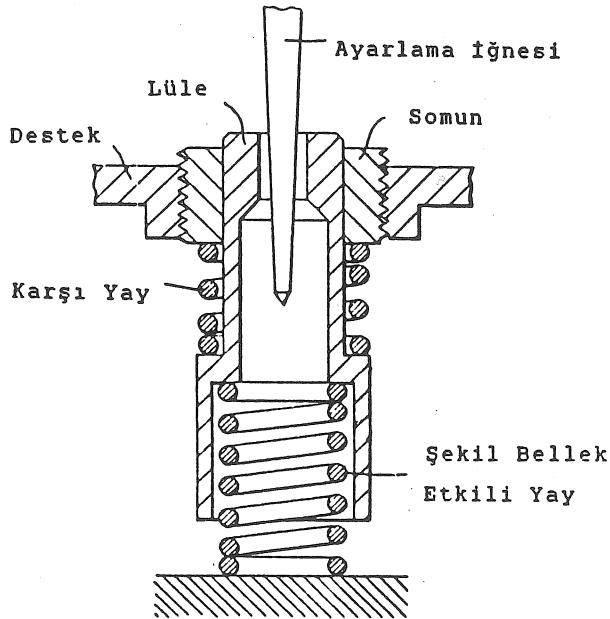


(a)

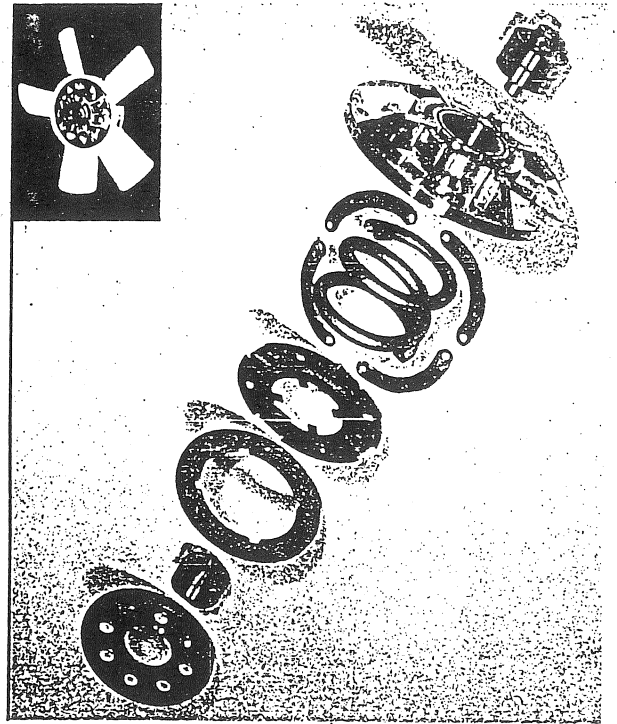


(b)

Şekil 13.



Şekil 14.



Şekil 15.

radyatörlerini soğutmak amacıyla geliştirilmiştir. Şekil-bellek etkisi ile çalışan kontrol cihazı radyatörden geçen hava sıcaklığını algılar ve soğutma gerekmediğinde fan 200-500 rpm arasında serbest olarak döner. Radyatördeki sıcaklık arttığında, radyatörden geçen hava sıcaklığı artar ve şekil-bellek etkisi ile çalışan kontrol cihazı genişleyerek, su pompası hızında dönen hareketli flanşla kavrama plakasının birbirine geçmesini sağlar. Bu durum fan hızının artmasına neden olur ve radyatör soğutulur.

Diğer fanlara göre bu tip bir fanın avantajı sıcaklığa bağlı çalışmasıdır. Hava sıcaklığı arttığında fanın hızı artar, böylece oluşan koşullara göre en fazla soğutma sağlanmış olur. Fanda sızıntı problemi yoktur ve yüksek motor hızlarında; fan hızı, akışkan hareket sistemlerinde oluşan viskozite değişikliği ile azalmaz.

Tipik bir 1300 cc'lik otomobile takılan fan 56 mph'de 2 mpg ve 70 mph'de 2 mpg'nin biraz altında yakıt tüketimi avantajı sağlar. Dinamik ve statik koşullarda sırasıyla 1.4 dB ve 2.5 dB toplam gürültü azalması kaydedilmiştir.

SONUÇ

Şekil-bellek özelliği gösteren Cu-Zn-Al alaşımını üretebilmek mümkün olmuştur. Elde edilen alaşımlar oda sıcaklığında martenzitik yapı içermektedir. Elde edilen alaşımlara oda sıcaklığında çekme deneyi uygulandığında, martenzit ve ana faz arasındaki sınırlar veya iç ikizler gibi hareketli kafes hataları çok düşük yük seviyelerinde (15- 25 N) plastik deformasyona neden olmuştur. 300 N 'a kadar çıkan yük kaldırıldığında, kalıcı bir şekil değişikliği gözlenmektedir. Fakat numuneler ısıtıldıklarında ilk konumlarına dönmektedirler. Martenzitik yapı, kırılğan bir özelliği olan ana fazın tersine oldukça esnektir. Yapılan tasarımlarda tasarım gerilmesi olarak genellikle ana faz gerilmesi alınmaktadır. Ana faz akma gerilmesi martenzitin 10 katı kadardır. Şekil bellekli alaşımlardan yeni tasarımlar, kullanımı ile ilgili yaratıcılıklar ortaya çıkıkça hızla artmaktadır.

PRODUCTION OF SHAPE-MEMORY WIRES AND SPRINGS

Cu-Zn-Al alloy systems are produced for wire and spring applications. Mechanical properties are measured using tension and hardness testing. Some examples of shape-memory applications are given as an indication of the range of possible devices.

KAYNAKÇA

1. Wayman, C.M., Some Applications of Shape Memory Alloys, *Journal of Metals*, 32 (1980) 6, 120-137.
2. Schetky, L.Mc Donald, Shape Memory Alloys, *Scientific American*, 241 (1979), 74-82.
3. Raychem Corporation, Menlo Park, California, 94025, *Shape Memory Actuators Improve Car Performance*, Company Brochure.
4. Raychem Corporation, Menlo Park, California, 94025, *Tinel Shape Memory Alloys*, Company Brochure.
5. Adnyana, Dewa N., A Copper-based Alloy for Shape Memory Wires and Springs, *Wire Journal International*, (1984), 52-61.
6. Raychem Corporation, Menlo Park, California, 94025, *Fabrication and Properties of Nickel-Titanium Shape Memory Alloy Wires*, Company Brochure.
7. Foxboro Corporation, Foxboro, Massachusetts, 02035, *Technical Information Sheets on Nitinol Pen Drive Unit*, Company Brochure.
8. Duering, T.W., and Melton, K.N., Designing with the Shape Memory Effect, *MRS Int'l. Mtg. on Adv. Mats.*, 9 (1989), 581-597.
9. Deleta Memory Metal Company, Ipswich, Suffolk, IP2 OEG, England, *Shape Memory Effect Thermal Actuators*, Company Brochure.
10. Delta Materials Research Limited, Kingsway, London Wc 2B 6xF, England, *German Patent No DE 29 22 402 Al*, 1979.
11. Ginell, W.S., Mc Nichols, J.L., Jr., and Cory, J.S., Nitinol Heat Engines, *Mechanical Engineering*, (1979), 28-33.
12. Andreasen, G.F., and Morrow, R.E., Laboratory and Clinical Analysis of Nitinol Wire, *American Journal of Orthodontics*, 73 (1978) 2, 142-151.
13. Netsu, N., Iwabuchi, T., and Honma, T., A Study of the TINI Intracranial Aneurysm Clip Having the Shape-Memory Effect, *Bulletin of the Research Institute of Mineral Dressing and Metallurgy University, Sendai, Japan*, 34 (1978), 67-73.
14. Sawyer, P.N., et al., Further Study of Nitinol Wire as Contractile Artificial Muscle for an Artificial Heart, *Bulletin of the Texas Heart Institute*, 3 (1976) 1, 65-68.