

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ŞEKİL HATIRLAMALI CuAlNi ALAŞIMLARININ ELEKTRİKSEL
İLETKENLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

Fethi DAĞDELEN

Yüksek Lisans Tezi

FİZİK ANABİLİM DALI

DOKÜMAN

83913

ELAZIĞ
1999

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ŞEKİL HATIRLAMALI CuAlNi ALAŞIMLARININ ELEKTRİKSEL
İLETKENLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Fethi DAĞDELEN

Yüksek Lisans Tezi

FİZİK ANABİLİM DALI

Bu Tez Tarihinde Aşağıda Belirtilen Jüri Tarafından Oy Birliği
/ Oy Çokluğu ile Başarılı / Başarısız Olarak Değerlendirilmiştir.

Yrd. Doç. Dr. Ayşe AYDOĞDU
Danışman

ÖZET**Yüksek Lisans Tezi****ŞEKİL HATIRLAMALI CuAlNi ALAŞIMLARININ ELEKTRİKSEL
İLETKENLİKLERİNİN İNCELENMESİ****Fethi DAĞDELEN****Fırat Üniversitesi****Fen Bilimleri Enstitüsü****Fizik Anabilim Dalı****1999, Sayfa: 58**

Bu çalışmada şekil hatırlamalı Cu₉₁Al₉-3.82Ni ve Cu₉₁Al₉-3.38Ni (ağırlık yüzdeli) alaşımlarının elektriksel iletkenlik özellikleri iki prob metodu kullanılarak incelendi. Düzensiz bir yapıya sahip olan bu alaşımlardan hazırlanan numuneler 930 °C'de 30 dakika (β -faz bölgesinde) ısıtılma tabi tutuldu ve tuzlu-buzlu suda ani soğutuldu. Bu işlemin sonucunda alaşımların M18R monoklinik yapıya sahip oldukları gözlemlendi.

M18R monoklinik yapıya sahip olan bu alaşımlar 200 °C'de 1, 3, 5 ve 7 saat yaşlandırmaya tabi tutuldular. Isıl işlemsiz numunelerin sıcaklığa bağlı direnç değişimleri düzenli bir değişim gösterdi. 200 °C'de yaşlandırılan numuneler için, sıcaklığa bağlı direnç düzensiz bir değişim gösterdi.

Bu alaşımların ani soğutmadan sonra kararlı olmayan bir yapıya sahip oldukları ve yaşlandırma ile kararsızlıklarının devam ettiği gözlemlendi.

Anahtar kelimeler: Şekil hatırlamalı alaşımlar, Elektriksel direnç, Termal yaşlandırma

SUMMARY
Master Thesis

INVESTIGATION OF ELECTRICAL CONDUCTIVITY OF SHAPE MEMORY
CuAlNi ALLOYS

Fethi DAĞDELEN

Firat University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Physics
1999, Page: 58

In this study, electrical conductivity properties of shape memory Cu₉₁Al_{3.82}Ni and Cu₉₁Al_{3.38}Ni (in weight) alloys were investigated by using two probe method. Specimens prepared from these alloys which have a disordered structure were annealed at 930 °C for 30 minutes (in the β -phase region) and then quenched in iced brine. Consequently, it was observed that the alloys have M18R monoclinic structure.

Ageing processes were applied to these alloys which have M18R monoclinic structure at 200 °C for 1, 3, 5 and 7 hours. Resistivity variations depend on temperature of the samples without thermal treatment exhibited an ordered variation. For the samples aged at 200 °C, resistivity depend on temperature showed a disordered variation.

It was seen that these alloys have not a stable structure after quenching and this unstability continued with the ageing

Key Words: Shape memory alloys, Electrical resistivity, Thermal ageing

TEŞEKKÜR

“Şekil Hatırlamalı CuAlNi Alaşımlarının Elektriksel İletkenliklerinin İncelenmesi” adlı yüksek lisans tezimin hazırlanmasında ilgi ve yardımlarını esirgemeyen hocam Yrd.Doç.Dr. Ayşe AYDOĞDU ve Yrd.Doç.Dr. Yıldırım AYDOĞDU’ ya saygı ve şükranlarımı sunarım.

Tez ile ilgili deneysel işlemlerde emeği geçen Arş.Gör. Fahrettin YAKUPHANOĞLU, Denizhan ÖZMEN ve Orkun DEMİRÖREN’e de ayrıca teşekkür ederim.

Fethi DAĞDELEN



İÇİNDEKİLER.....Sayfa No

ÖZET	II
SUMMARY.....	III
TEŞEKKÜR	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	VII
TABLolar LİSTESİ.....	X
SİMGELER LİSTESİ.....	XI
 1. GİRİŞ.....	 1
 2. MARTENSİTİK DÖNÜŞÜMLER.....	 3
2.1. Martensitik Dönüşümlerin Genel Karakteristiği.....	4
2.2. Şekil Hatırlama Olayının Mekanizması.....	7
2.2.1. Tek yönlü şekil hatırlama olayı.....	8
2.2.2. Çift yönlü şekil hatırlama olayı.....	10
2.3. Dönüşümün Kristalografisi.....	11
2.4. Dönüşüm Sıcaklıkları.	15
 3. TERMOELASTİK MARTENSİTİK DÖNÜŞÜM GÖSTEREN ALAŞIMLARIN ELEKTRİKSEL İLETKENLİK DEĞİŞİMLERİ.....	 16
3.1. Özdirenç ve Elektriksel İletkenlik.....	16
3.2 Martensitik Dönüşüm Gösteren Alaşımlarda Elektriksel İletkenlik.....	17
3.3. Elektriksel İletkenliklerin Sıcaklığa Bağlı Değişimleri	19
3.4. Elektriksel İletkenliklerin Yaşlandırmaya Bağlı Değişimleri.....	23
3.5. Elektriksel İletkenliklerin Uygulanan Zora Bağlı Değişimleri	25
 4. ELEKTRİKSEL İLETKENLİK ÖLÇME METODLARI.....	 26
4.1. İki Prop Metodu.....	26
4.2. Dört Prop Metodu.....	26
4.3. Değmesiz Özdirenç Metodu.....	28
 5. DENEYSEL İŞLEMLER.....	 29
5.1. Isıl İşlemler.....	29
5.2. Metalografik Gözlemler	34
5.3. Elektriksel İletkenlik-Sıcaklık Ölçümleri.....	34

6. ÖLÇÜM SONUÇLARI.....	36
6.1. Metalografik Gözlem Sonuçları.....	36
6.2. Numunelerin Öz dirençlerinin Hesaplanması.....	38
6.3. Isıl İşlemsiz Numunenin Elektriksel İletkenlik Ölçüm Sonuçları	38
6.4. Isıl İşlemli Numunelerin Elektriksel İletkenlik Ölçüm Sonuçları.....	38
6.5. Elektriksel İletkenliğin Yaşlandırmaya Bağlı Ölçüm Sonuçları.....	40
7. SONUÇLAR ve TARTIŞMA.....	42
8. KAYNAKLAR.....	44



SEKİLLER LİSTESİ**Sayfa No**

Şekil 2.1. Austenit ve martensit fazların kimyasal serbest enerjilerinin sıcaklıkla değişimi (Christian, 1975; Funakubo, 1987).....	3
Şekil 2.2. Martensitik dönüşüme etki eden bozulma çizgisinin kırılması ve yüzey kabartısının şekli. a) Yüzey kabartısı , b) Bozulma çizgisinin kırılması. (Funakubo, 1987; Ortin ve Planes, 1989).....	5
Şekil 2.3 Martensitik dönüşümün difüzyonsuz tabiatına bağlı düzlem ve doğrultulardaki değişim.(Funakubo,1987; Ortin vePlanes,1989).....	5
Şekil 2.4. Austenit yapıyla martensit yapı arasındaki izotermal dönüşümü karakterize eden sıcaklıklar.	6
Şekil 2.5. Şekil hatırlama olayının şematik gösterimi.....	8
Şekil 2.6. Tek yönlü ve çift yönlü şekil hatırlama olayının şematik gösterimi.....	9
Şekil 2.7. Şekil hatırlamalı alaşımlarda termomekanik olarak çift yönlü şekil hatırlama olayının sıcaklık-zorlanma eğrisi.....	11
Şekil 2.8. B2 fazının temel yapısı ve (110) düzleminde AB tabakalarındaki atom görünüşleri.....	12
Şekil 2.9. Ana faz $(0\bar{1}1)\beta$ ve martensit fazın (001) düzlemlerinin yığılım düzeni a) B2, b) 3R(ABC), c) 3R(ACB), d) 9R(ABCBCACAB), e) 9R(ACBCBABAC), f) 2H(AB).....	13
Şekil 2.10. $DO_3 \rightarrow 18R$ dönüşümü, a) Martensit temel düzlemi, b) DO_3 yapısında (110) düzlemlerinin sıralanışı, c) 18R martensit yapısında (001) düzlemleri.....	14
Şekil 2.11. Cu-Al-Ni alaşımlarında Al konsantrasyonuna bağlı olarak dönüşüm sıcaklıklarının değişimi (Funakubo, 1987).....	15
Şekil 3.1. Bir maddeye uygulanan V gerilimi, içerisinde oluşan E alanı ve geçen I akımı.....	16

Şekil 3.2. FeNi (termoelastik olmayan) ve AuCd (termoelastik olan) alaşımlarında martensit dönüşümlerinin histeresis eğrileri (Funakubo, 1987).....	18
Şekil 3.3. Cu - %38,8 Zn alaşımında termoelastik martensit dönüşümde elektriksel direncin sıcaklıkla değişimi (Wechsler, 1985).....	18
Şekil 3.4. TiNi alaşımının elektriksel iletkenliğinin sıcaklığa bağlı değişimleri (Funakubo, 1987).....	20
Şekil 3.5. ZnRh alaşımının sıcaklığa bağlı elektriksel iletkenliğinin değişim karakteristiği (Nemonshkalenko vd., 1995).....	20
Şekil 3.6. CuAlNi alaşımının sıcaklığa bağlı elektriksel iletkenlik değişim karakteristiği (Morii vd., 1985).....	21
Şekil 3.7. NiCrAl alaşımının sıcaklığa bağlı elektriksel iletkenlik değişim karakteristiği (Hight ve Plough, 1983).....	22
Şekil 3.8. 340 °C de 6 saat yaşlandırılan NiCrAl alaşımının sıcaklığa bağlı elektriksel iletkenlik değişim karakteristiği (Hight ve Plough, 1983).....	22
Şekil 3.9. Cu-Zn-Al elementlerinin farklı atomik yüzdelerde alınarak oluşturulan alaşımların 240 °C ve 280 °C de termal yaşlandırmaya bağlı elektriksel iletkenlik değişim karakteristiği (Lee ve Kim, 1990).....	23
Şekil 3.10. Fe-50.5%Rh alaşımının sıcaklığa bağlı elektriksel iletkenliğinin değişimi (a) su ile soğutularak, (b) fırında soğutularak (Oshima vd., 1992).....	24
Şekil 3.11. FeRh (Fe-50.5%Rh) alaşımının farklı zamanlar için 973 K'de yaşlandırmaya bağlı elektriksel direnç eğrisi (Oshima vd., 1992).....	24
Şekil 3.12. Ni ₄₇ Ti ₄₄ Nb ₉ alaşımının elektriksel iletkenliğinin ve dönüşüm sıcaklıklarının uygulanan zora bağlılığı (a)tavlama, (b) ε=%8, (c) ε=%14, (d) ε=%16, (e) ε=%20 (Lian vd., 1992).....	25
Şekil 4.1. İki prob metodu ile öz direnç ölçüm sistemi.....	26

Şekil 4.2. Dört prob sistemi.....	27
Şekil 4.3. Değmesiz öz direnç ölçme sistemi.....	28
Şekil 5.1. Alaşım 1 numunesinin imal edildikten sonraki orijinal halinden elde edilen tipik x-ışını toz difraktogramı.....	30
Şekil 5.2. Alaşım 2 numunesinin imal edildikten sonraki orijinal halinden elde edilen tipik x-ışını toz difraktogramı.....	31
Şekil 5.3. Hızlı soğutma sonrasında martensit şartlarda ($T < M_f$) Alaşım 1 numunesinin elde edilen tipik x-ışını toz difraktogramı.....	32
Şekil 5.4. Hızlı soğutma sonrasında martensit şartlarda ($T < M_f$) Alaşım 2 numunesinin elde edilen tipik x-ışını toz difraktogramı.....	33
Şekil 5.5. İletkenlik ölçümüne hazır haldeki numunenin şekli.....	34
Şekil 6.1. Isıl işleme tabi tutulmayan, a) Alaşım 1, b) Alaşım 2' nin yüzey fotoğrafları.....	37
Şekil.6.2. 930 °C'de β -faz bölgesinde 30 dakika süre ile homojenleştirilen ve tuzlu buzlu suda ani soğutulan numunelerden alınan yüzey mikrografları, a) Alaşım 1, b) Alaşım 2.....	37
Şekil 6.3. Isıl işlemsiz numunenin R/R_0 –Sıcaklık grafikleri a) Alaşım 1, b) Alaşım 2.....	39
Şekil 6.4. 930 °C'de β -faz bölgesinde 30 dakika süre ile homojenleştirilen ve tuzlu-buzlu suda ani soğutulan numunelerin, R/R_0 –Sıcaklık grafikleri a) Alaşım 1, b) Alaşım 2.....	39
Şekil 6.5. Alaşım 1'nin yaşlandırmaya bağlı R/R_0 –Sıcaklık grafikleri. a) 1 saat b) 3 saat c) 5 saat d) 7 saat yaşlandırılan numuneler.....	40
Şekil 6.6. Alaşım 2'nin yaşlandırmaya bağlı R/R_0 –Sıcaklık grafikleri. a) 1 saat b) 3 saat c) 5 saat d) 7 saat yaşlandırılan numuneler.....	41

TABLolar LİSTESİ

Tablo 5.1. Alaşım 1 ve Alaşım 2'nin kimyasal kompozisyonları.....29

Tablo 6.1. Numunelerin 27 °C deki elektriksel özdirençleri ve elektriksel iletkenlik katsayıları.....38



SİMGELER LİSTESİ

arb.u : Keyfi Birim

A_f : Martensit → austenit dönüşümde austenit yapının tamamlandığı sıcaklık

A_s : Martensit → austenit dönüşümde austenit başlama sıcaklığı

a_0 : Austenit örgünün örgü parametresi

bcc : Cisim merkezli kübik yapı

bct : Cisim merkezli tetragonal yapı

fcc : Yüzey merkezli kübik yapı

fct : Yüzey merkezli tetragonal yapı

$h k l$: Kristal yapı düzlemlerini belirleyen indis sistemi (Miller indisi)

M_f : Austenit → martensit dönüşümünde martensit yapının tamamlandığı sıcaklık

M_s : Austenit → martensit dönüşümünde martensit başlama sıcaklığı

T_{B2} : B2 yapıya geçiş sıcaklığı

T_C : Kritik sıcaklık

T_0 : Austenit yapının termodinamik dengedeki sıcaklığı

X_a, Y_a, Z_a : Austenit yapıyı tanımlayan örgü sisteminin eksenleri

X_m, Y_m, Z_m : Martensit yapıyı tanımlayan örgü sisteminin eksenleri

α : Çökelti fazı (fcc)

β : e / a oranı (elektron / atom) 1,5 civarında olan süper örgülü kübik austenit faz

β_1 : DO_3 türü ana faz yapısı (bcc)

β_2 : B2 türü ana faz yapısı (bcc)

ϵ : Zorlanma

σ : Zor

σ : Elektriksel iletkenlik

ρ : Özdirenç

J : Akım yoğunluğu

μ : Mobilite

1. GİRİŞ

Katıhal fiziğinde önemli bir yere sahip olan martensitik faz dönüşümü olayı, ilk defa Alman metalurjist A. Martens tarafından demir bazlı alaşımlarda gözlenmiştir. Daha sonraları yapılan çok sayıda araştırma ile büyük bir gelişmeye sahip olan martensitik dönüşümler, demir bazlı alaşımların yanı sıra geniş çapta soy metal bakır bazlı alaşımlarda ve metalik özellik taşımayan maddelerde de gözlenmiştir (Durlu, 1979; Artunç, 1988; Noyan, 1990).

Dönüşüm olayına göre metal ve alaşım sistemlerindeki faz dönüşümleri, çekirdeklenme - büyüme dönüşümleri ve martensitik dönüşümler olmak üzere iki sınıfa ayrılır (Barrett, 1980). Çekirdeklenme-büyüme dönüşümleri sabit sıcaklıkta termal etkileşme ile difüzyonlu olarak meydana gelir. Martensitik dönüşüm ise sistemin sıcaklığı değiştirilerek veya deforme edilerek meydana gelebileceği gibi her iki etkinin birlikte uygulanması ile de gerçekleşebilir. Sıcaklık etkisiyle oluşan martensitik dönüşümler alaşım sistemlerine göre atermal ve izotermal olarak meydana gelir. Deforme edilerek oluşan martensit zorlama ile oluşmuş martensit, hem deforme edilerek hem de sıcaklık etkisiyle oluşan martensit ise zorla etkilendirilmiş martensit adını alır (Olson ve Cohen, 1975).

Metal ve alaşımlarda dönüşüm öncesindeki faz, austenit fazı olarak bilinir. Bu fazın bir kısmı atom komşularını değiştirmeden yeni bir faza dönüştüren martensit faz dönüşümleri atomların toplu hareketleri ile ortaya çıkan bir faz dönüşümüdür. İlk kez Bain tarafından kristalografik olarak açıklanmıştır (Bain, 1924). Austenit faz ya da ana faz olarak adlandırılan dönüşüm öncesi kristal yapının dışarıdan sıcaklık, zor veya her iki faktörün birlikte uygulanmasıyla yeni faz olan martensit yapıya dönüş gerçekleşir. Martensit kristal yapısının hem iç ikizlenmeleri ve kusurları hem de farklı kristal yapıları kapsadığı anlaşıldıktan sonra, bir çok alaşımda termoelastik martensit dönüşümünün incelenmesi ve sonuçta termoelastik davranışın genel bir tanımını yapmak mümkün olmuştur (Olson ve Cohen, 1975).

Bazı alaşımların, sıcaklığın değiştirilmesi ve zorlanma etkisi ile şekillerini değiştirmesi ve ters dönüşümle tekrar orijinal şeklini alması olayı (Shape Memory Effect) günümüzde endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır. Şekil hatırlama olayı, çok farklı özellikte numune hazırlayabilme yolunu açmaktadır (Aydoğdu, 1990).

Şekil hatırlama olayının ilk gözlenmesi 1938'lere dayanır. Daha sonraki yıllarda pirinç içindeki martensit fazın sıcaklığın değişmesi esnasında yok olduğu gözlendi (Schetky, 1980). Aynı zamanlarda Rus metalurjisti G.V. Kurdjumov, martensit kristalografisi üzerinde çalıştı. Kurdjumov, özellikle çelik içinde hızlı soğutmayla oluşan martensiti inceledi. Şekil hatırlama olayının gözlenmesi ilk olarak Amerika'da

Naval Ordnance Laboratuvarında yaklaşık olarak eşit atomlu NiTi alaşımında gerçekleşti. Burada düşük sıcaklıktaki numuneyi deforme ettikten sonra sıcaklığı artırdılar ve numunenin orijinal haline geri döndüğünü gözlediler. Bu olay, alışımlış plastik deformasyon göz önüne alındığında büyük ilgi çekicidir (Golestaneh, 1984). Sonraki yıllarda Illinois üniversitesinde araştırmacılar, altın-kadmiyum alaşımlarındaki şekil hatırlama olayını gözlediler ve faz geçişleri nedeniyle oluşan kuvvetleri gösterdiler. Ayrıca demir-platin, indiyum-kadmiyum, nikel- alüminyum ve paslanmaz çelik gibi farklı alaşımların, farklı sıcaklıklarda şekil hatırlama olayı gösterdiklerini ortaya koydular. Bütün bu alaşımlar için ortak özellik, martensitik dönüşüm göstermeleridir. Bundan dolayı şekil hatırlama olayı martensitik faz dönüşümüne göre farklı olarak görülmekle birlikte şekil hatırlama olayının temeli martensitik dönüşümdür.

Martensitik dönüşüm gösteren alaşımlar, sıcaklığa, zora ve termal çevrimlere karşı oldukça hassas olup, parametrelerinde değişimler olmaktadır (Aydoğdu, 1995). Martensitik dönüşüm gösteren alaşımların elektriksel iletkenlikleride sıcaklık, zor uygulanarak, yaşlandırma ve termal çevrim ile değiştirilebilir. Büyük histeresis gösteren alaşımlar termoelastik olmayan bir martensit dönüşümü, küçük histeresis gösteren alaşımlar termoelastik bir martensit dönüşüm gösterir.

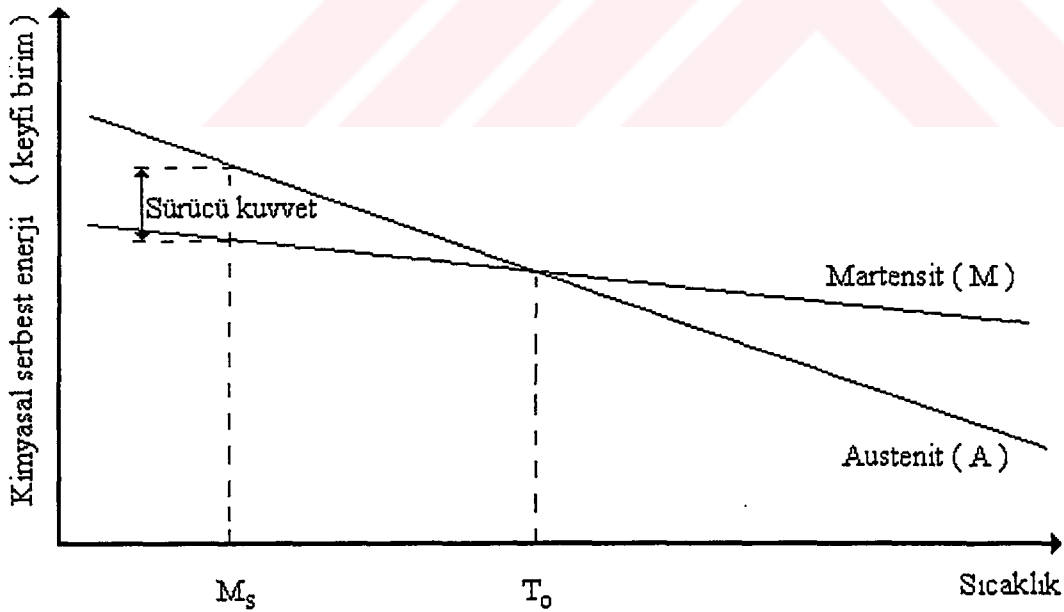
Dönüşüm, M_s sıcaklığında alaşım içinde kimyasal serbest enerjinin en düşük olduğu noktalarda plakalar teşekkül etmek suretiyle başlar. Sıcaklık düşüşüyle mevcut plakalar büyüdüğü gibi bunlara yenileri eklenerek bu işlem, kristal tamamen ürün faza dönüşüncüye kadar devam eder. M_f (martensitik bitiş sıcaklığı) dönüşümün tamamlandığı sıcaklıktır. Numune $T > A_f > A_s$ sıcaklığına kadar ısıtılırsa ters dönüşüm meydana gelir. Martensit plakalarından başlamak kaydıyla ters dönüşümün etkisi ile austenit yapı elde edilir (Wechsler, 1985).

Martensitik dönüşüm gösteren alaşımların elektriksel iletkenlikleri sıcaklık değişimlerine karşı oldukça duyarlıdır. Sıcaklık artışı ile elektriksel dirençlerinde artış gözlenir. Aynı zamanda termal çevrimler uygulandığında yine elektriksel direnç değişir. Bu durumda meydana gelen histeresis çevrim sayısının artışı ile büyür (Funakubo, 1987).

Şekil hatırlamalı alaşımlarda, martensitik dönüşüm sıcaklıklarını (M_s , M_f , A_s ve A_f) tespit etmenin bir yöntemi de elektriksel iletkenliklerinin ölçülmesidir. Elektriksel iletkenlik değişimleri ölçülerek iletkenlik-sıcaklık eğrisindeki histeresisten M_s , M_f , A_s ve A_f sıcaklıklarını bulmak mümkündür.

2. MARTENSİTİK DÖNÜŞÜMLER

Martensitik faz dönüşümü, numune sıcaklığının hızla düşürülmesi veya austenit yapıya dıştan uygulanan bir mekanik zor ya da her ikisinin aynı anda uygulanmasıyla meydana gelir. Austenit kristal yapı, bir T_0 sıcaklığında termodinamik dengededir. Kristal yapı bu sıcaklıktan hızla soğutulursa kritik bir M_s sıcaklığından sonra, austenit kristal yapı içerisinde martensit yapı oluşmaya başlar. Bu M_s sıcaklığına martensit başlama sıcaklığı denir ve değişik alaşımlar için farklı değerlere sahiptir. $(T_0 - M_s)$ sıcaklık farkı, fazlar arasındaki kimyasal serbest enerjiyi, bu enerji de dönüşüm için gerekli sürücü kuvveti doğurur (şekil 2.1). Bu anda dışarıdan uygulanacak bir mekanik zor ile, M_s sıcaklığı T_0 sıcaklığının çok altına düşmeden dönüşüm başlayabilir. Dışarıdan uygulanan bu mekanik zor M_s yi artırdığı gibi dönüşen hacim miktarını da artırır (Christian, 1975; Funakubo, 1987). M_s sıcaklığında başlayan martensit dönüşüm belli bir sıcaklık aralığında devam eder ve durur. Dönüşümün bittiği bu sıcaklığa martensit bitiş sıcaklığı (M_f) denir. Martensit haldeki dönüşmüş numune ısıtılınca tekrar ana faz olan austenit yapıya dönüşür. Bu nedenle martensit dönüşüm tersinir bir olaydır. Ters dönüşüm de martensit dönüşümde olduğu gibi belli bir sıcaklıkta başlayıp belli bir aralıkta devam ettikten sonra tamamlanır. Bu sıcaklıklar da austenit başlama (A_s) ve austenit bitiş (A_f) sıcaklıkları olarak adlandırılır.



Şekil 2.1. Austenit ve martensit fazların kimyasal serbest enerjilerinin sıcaklıkla değişimi (Christian, 1975; Funakubo, 1987).

2.1. Martensitik Dönüşümlerin Genel Karakteristiği

Martensitik dönüşüm, difüzyonsuz tabiatının yanı sıra bir kristal yapıdan yeni bir kristal yapıya dönüşümle karakterize edilir. Difüzyonsuz martensitik dönüşümler çoğu metaller, alaşımlar ve bileşiklerde gözlenmiştir. " Martensitik dönüşüm " terimi yaygın olarak günümüzde kullanılır ve katılardaki bir faz dönüşümünü ifade eder.

Martensitik dönüşüm basit olarak tarif edilebilir. Bir örgü dönüşümü, kesme deformasyonunu ve atomik hareketi içine alır. Martensitik dönüşüm, metal ve alaşımlarda görülen birinci mertebeden bir yapısal faz dönüşümü olup austenit (ana) faza dışarıdan uygulanan sıcaklık ve zorun ayrı ayrı veya birlikte etkisiyle martensit (ürün) fazın elde edilmesi olayıdır. Martensitik dönüşümlerin genel karakteristikleri şu başlıklar altında özetlenebilir (Funakubo, 1987; Ortin ve Planes, 1989).

1) Martensitik faz ara bir katı çözüldür.

2) Dönüşüm difüzyonsuzdur. Yani kristaldeki atomların dönüşüm öncesindeki komşulukları dönüşüm sonrasında da korunur.

3) Dönüşüm, sınırlı bir şekil değişikliğiyle meydana gelir. Ana faz durumunda, numunenin yüzeyi düzeltilip parlatıldıktan sonra sıcaklığı düşürülürse yüzey üzerinde meydana gelen martensitik fazlı bazı bölgeler kabartılar şeklinde gözlenir (şekil 2.2.a). Şekil 2.2 b'de görüldüğü gibi austenit yapı ile martensit yapı arasındaki sınırda bir bozulma çizgisi ortaya çıkar. Martensitik dönüşümlere eşlik eden şekil değişiklikleri şekil hatırlama olayında önemli bir rol oynar.

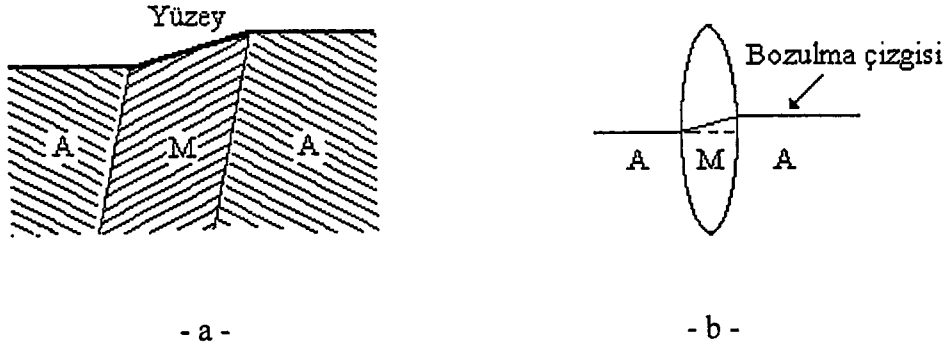
4) Bir martensitik dönüşümde bozulmamış olarak kalan ve ana faz ile ürün fazı ayıran düzleme yerleşme düzlemi (habit plane) denir. Şekil 2.3'de görüldüğü gibi yerleşme düzlemi değişmez bir düzlemdir ve bu düzlem üzerindeki doğrultular bozulmamıştır.

5) Austenit faz ile martensitik faz örgüleri arasında sınırlı bir dönme bağıntısı vardır.

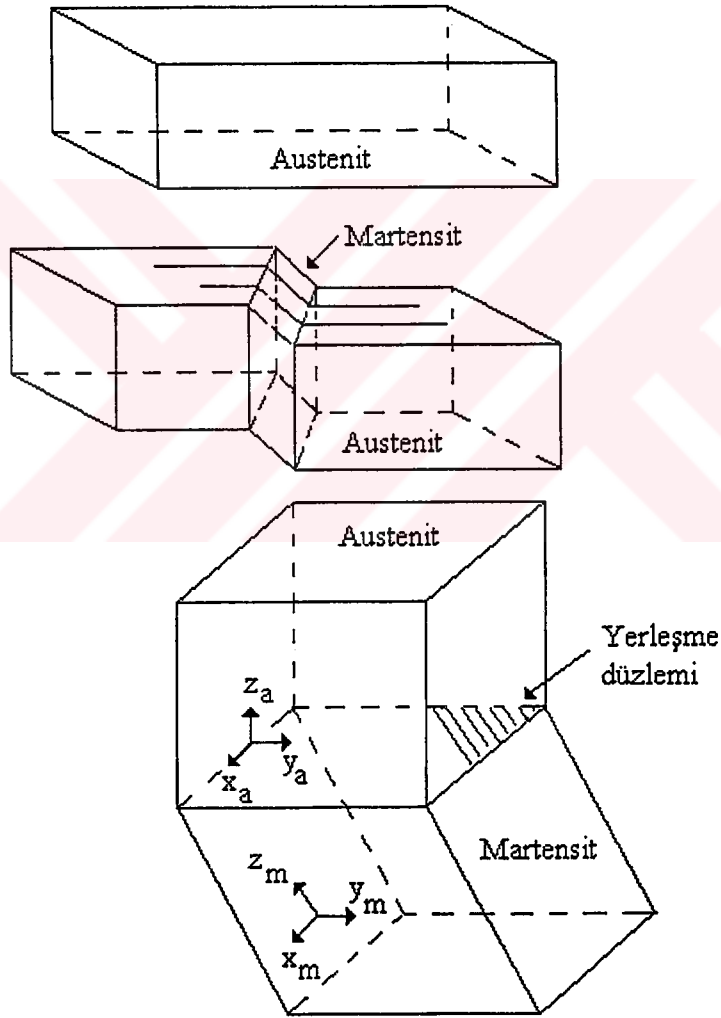
6) Dönüşümde kristal örgü kusurları da oluşur.

Martensitik dönüşümlerde bir arayüzeyin büyümesiyle ürün faz oluşur. Arayüzeyin büyümesi esnasındaki hareketler çok düzenli ve hızlıdır. Ayrıca hem çekirdek arayüzey yapısı hem de dönme bağıntıları arasında paralellik vardır.

Martensit fazı, alaşımın cinsine bağlı olarak ince plaka, iğne, kama ve benzeri şekillerde oluşabilir. Martensitik plakaların bünyesinde, kristaloğrafik ikizlenme ve dislokasyonlardan kaynaklanan kristal kusurları bulunur. Martensit plakaları, kristal yüzeyinde oluşursa yüzey kabartılarına yol açar. Bu yüzey kabartıları makroskobik olarak görülen en belirgin özelliştir.



Şekil 2.2. Martensitik dönüşüme etki eden bozulma çizgisinin kırılması ve yüzey kabartısının şekli. a) Yüzey kabartısı, b) Bozulma çizgisinin kırılması (Funakubo, 1987; Ortin ve Planes, 1989).



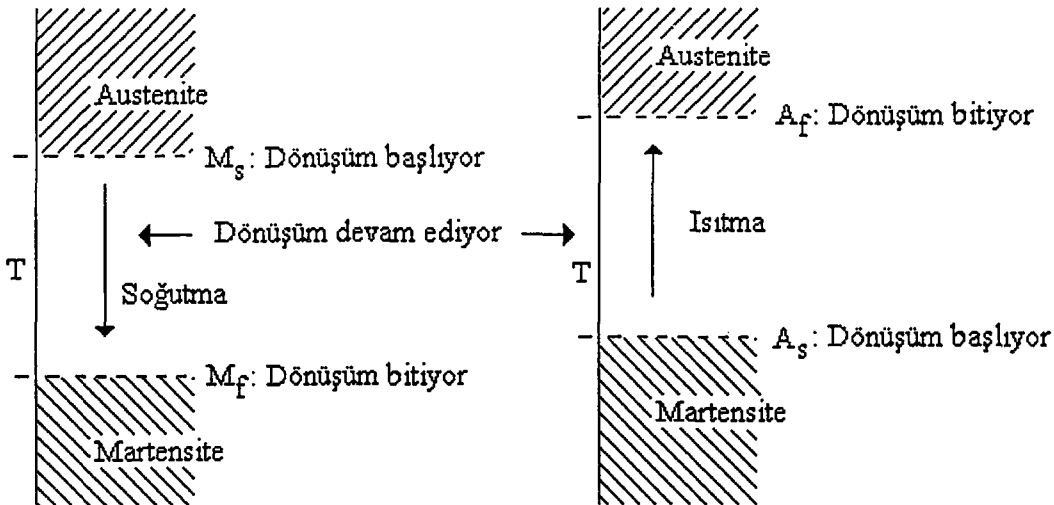
Şekil 2.3. Martensitik dönüşümün difüzyonsuz tabiatına bağlı düzlem ve doğrultulardaki değişim (Funakubo, 1987; Ortin ve Planes, 1989).

Martensit dönüşümlerinin termoelastik olan ve termoelastik olmayan iki tipi vardır. Şekil hatırlamalı alaşımlar termoelastik martensit dönüşümü gösterir. Çünkü, büyüme kinetikleri ve dar histeresis şekil hatırlama olayı için gereklidir (Çakmak, 1992).

Sıcaklık etkisiyle oluşan martensitik dönüşümler, alaşım sistemlerine göre atermal ve izotermal olarak meydana gelir. Martensitik dönüşümlerin izotermal ve atermal olması alaşımın kimyasal bileşimine bağlı değildir. Bu yüzden izotermal ve atermal dönüşümlerin her ikisi aynı alaşım içerisinde meydana gelebilir. Ancak meydana gelen dönüşümlerin bu iki tipi için dönüşüm sıcaklıkları ve dönüşüm sonrası ürün yapılar farklıdır (Nishiyama, 1978).

Atermal dönüşümde, austenit fazdaki numunenin sıcaklığı düşürülürse belli bir M_s sıcaklığına (yani $T = M_s$ de) gelindiğinde austenit yapı martensit yapıya dönüşür ve dönüşüm tamamlanır. Bazı durumlarda martensit, M_s sıcaklığının altında veya üstünde atermal olarak oluşabilir. Dönüşüm çok hızlı olup patlama (burst) reaksiyonları şeklinde olduğundan bu dönüşümde şekil hatırlama olayı gözlenmez.

İzotermal dönüşümde ise austenit haldeki numunenin sıcaklığı düşürülerek belli bir M_s sıcaklığına gelindiğinde austenit yapı içinde martensit yapı oluşmaya başlar. Sıcaklık düşüşü ile dönüşüm devam eder ve M_f sıcaklığında tamamlanır. Bunun tersi de mümkündür. Martensit fazdaki alaşım ısıtılınca A_s sıcaklığında, austenit yapı oluşmaya başlar ve A_f sıcaklığında, yapı tamamen austenit faza dönüşür. Şekil 2.4'te görüldüğü gibi, A_s sıcaklığı M_f sıcaklığıyla aynı değerde değildir. İzotermal dönüşüm belli bir sıcaklıkta ani olarak başlayıp bitmediğinden ve belli bir sıcaklık aralığında devam ettiğinden bu dönüşümün olduğu alaşımlarda şekil hatırlama olayı gözlenir.



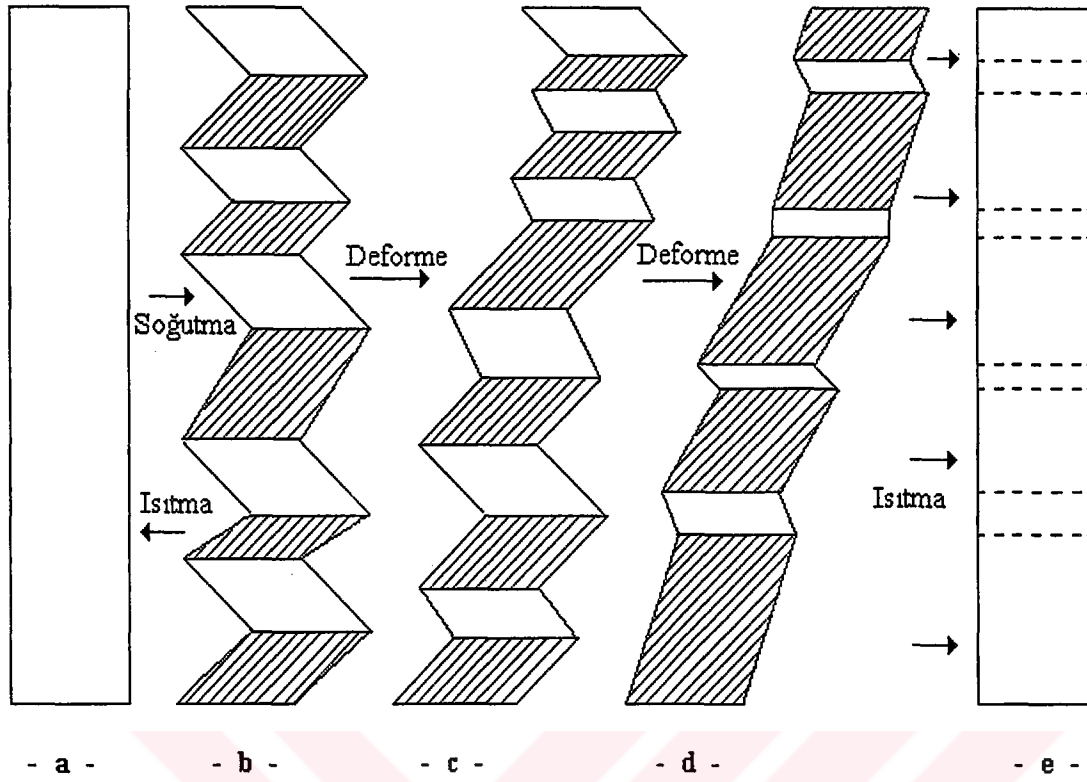
Şekil 2.4. Austenit yapıyla martensit yapı arasındaki izotermal dönüşümü karakterize eden sıcaklıklar.

2.2. Şekil Hatırlama Olayının Mekanizması

Bu kısımda şekil hatırlama olayının mekanizması tanıtılacaktır. Şekil hatırlama olayı gösteren bir alaşım belirli bir kristal yapıya sahip olmalıdır. Bu yapı martensit haldeyken sıcaklık ve zora bağlı olarak değişebilir. Şekil hatırlama özelliğine sahip alaşımdan yapılmış bir çubuk, martensit dönüşüm sağlandıktan sonra yonca yaprağı şeklinde eğilirse ve daha sonra ısıtılırsa austenit halde tekrar çubuk haline döner. Buradan da görüldüğü gibi şekil hatırlama olayı gösteren alaşım için martensit faz dönüşümü esastır (Adıgüzel ve Ceylan, 1988).

Şekil hatırlama olayı, mekanikteki elastik bir yayın davranışına benzetilebilir. L_0 boyundaki esnek bir yay esneklik sınırları içerisinde bir kuvvet uygulanırsa yayın boyu L olur. Yay üzerindeki kuvvet kaldırılınca yay yine eski boyunu alır, yani L_0 olur. Şekil hatırlama olayı da buna benzerdir. Martensit dönüşüm tamamlandıktan sonra (M_f sıcaklığının altında) numune deforme edilirse ve daha sonra sıcaklık yükseltip austenit hale döndüğünde numune, austenit haldeki normal durumunu alıyorsa bu olaya şekil hatırlama olayı denir.

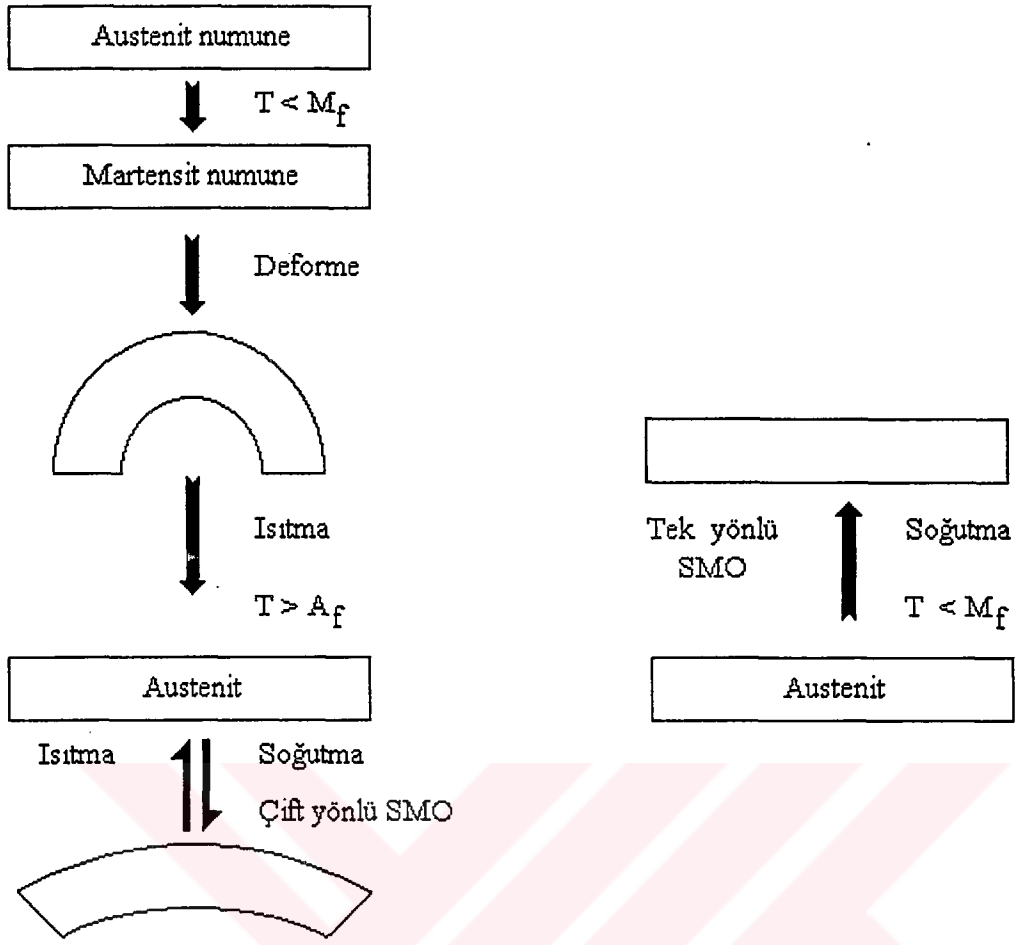
Şekil hatırlama olayı şekil 2.5'de şematik olarak açıklanabilir. Önce tek bir kristal yapıya sahip ana faz ele alınır (şekil 2.5.a). Numune M_s den düşük sıcaklıklara soğutulduğu zaman martensit fazda iki farklı durum elde edilebilir (gerçekte 24 farklı durum olabilir). İki farklı durum için kesme zorlanması veya şekil zorlanması hemen hemen eşit olup zıt yöndedir ve şekil 2.5 c ve d'de gösterildiği gibi olur. Numune A_f üzerindeki sıcaklıklara ısıtıldığı zaman her farklı durum şekil 2.5 e'de görüldüğü gibi orijinal durumunu alarak austenit hale gelir (Otsuka ve Shimizu, 1986).



Şekil 2.5. Şekil hatırlama olayının şematik gösterimi.

2.2.1. Tek yönlü şekil hatırlama olayı

Tek yönlü şekil hatırlama olayı şematik olarak şekil 2.6’te görüldüğü gibidir. Alaşım martensit bitiş sıcaklığının altındaki bir sıcaklıkta ($T < M_f$) deforme edilince uygulanan zorun kaldırılması durumunda numune kendi orijinal durumuna geri dönemez. Isıtma sonucunda , numunedeki artık zor , sıcaklık kritik bir sıcaklığın üzerine çıkarken kademeli olarak geri döner. Sıcaklığın tekrar düşürülmesi üzerine, numune deforme edilmiş şeklini kazanamaz. Martensit dönüşümü ve yeniden yönelimle artık zorlanma oluşturma özelliği ve ısıtma sonucunda deformasyon öncesi orijinal β -faz yöneliminin tekrar elde edilebilmesi, tek yönlü şekil hatırlama olayının temel mekanizmasıdır (Friend, 1986).



Şekil 2.6. Tek yönlü ve çift yönlü şekil hatırlama olayının şematik gösterimi.

Tek yönlü şekil hatırlama olayı NiTi, TiNb, NiAl, FePt, CuZnSi, CuZnSn, FeMnC gibi birçok alaşım sistemlerinde gözlenmiştir (Honna, 1986; Sade, vd., 1988; Tautzenberger, vd., 1989). Bu şekil hatırlama türünün zorlanma limiti, kendiliğinden martensit dönüşümün biçim zorlanmasına bağlıdır. Bu limit, deformasyon etkili bir martensit tek kristalinin sadece terslenmesiyle ortaya çıkar. Pratikte bu seviyeye sadece β -faz tek kristallerinde ulaşılır.

Tek yönlü şekil hatırlama olayına tersinmez şekil hatırlama olayı da denir. Örnek olarak, austenit haldeki bir çubuk sıcaklık düşürülerek martensit hale döndürüldüğünde şeklini değiştirmez. Fakat martensit haldeki bu çubuğa bir deformasyon uygulanırsa şekli bozulur. Bu şekil bozukluğunun şekil 2.6'daki gibi kavisli şekilde olduğu kabul edilirse, numune ısıtıldığında tekrar çubuk şeklini alarak austenit fazdaki orijinal şeklini alır.

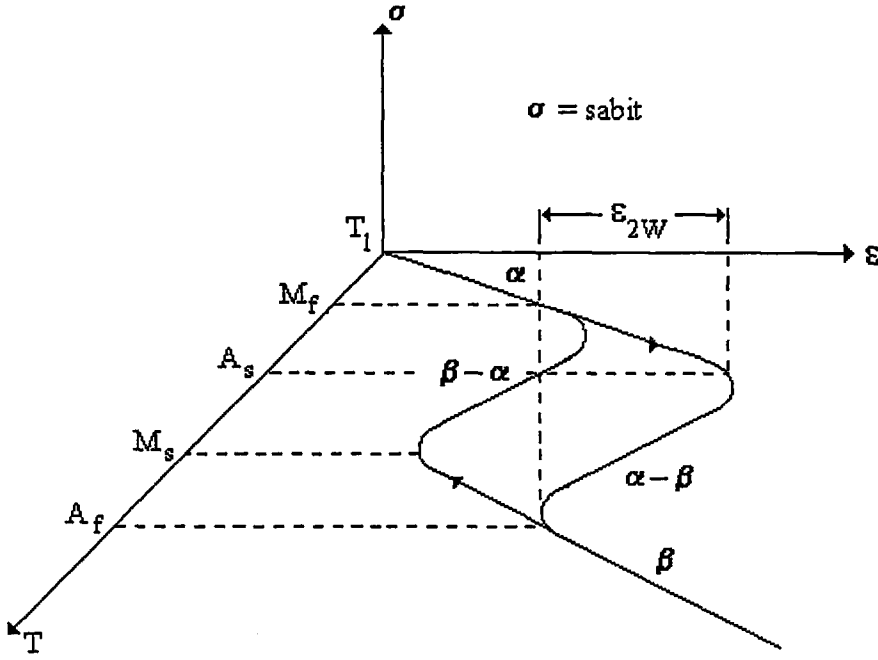
2.2.2. Çift yönlü şekil hatırlama olayı

Şekil hatırlamalı alaşımlarda gözlenen martensit dönüşümleri uygulanan zor ve sıcaklık etkisine bağlı olarak çift yönlülük (tersinirlik) gösterirler. Tersinirlik nedeniyle bu alaşımlar diğer alaşım sistemlerinden farklı mekaniksel davranış sergilerler (Delaey, vd., 1974).

Tersinir şekil hatırlama olayının mekanizması şekil 2.6'da şematik olarak gösterildiği gibidir. $T < M_f$ sıcaklığında tamamen martensit fazdaki bir numuneye dışarıdan zor uygulanmakla istenilen uygun bir şekil verilebilir. Yapılan bu plastik deformasyon sonucunda, uygulanan zorun kaldırılmasıyla numune deforme edilmiş şeklini korur. Deforme edilmiş numunenin sıcaklığı $T > A_f$ ye yükselttilince plastik deformasyon ortadan kalkar ve deformasyon öncesi şekle ulaşılır. Numunenin sıcaklığı tekrar $T < M_f$ sıcaklığına düşürülürse daha önceki deforme edilmiş şeklini alır. Bu da tersinir şekil hatırlama olayının bir sonucudur.

Sadece sıcaklığın fonksiyonu olarak çift yönlü şekil hatırlama olayı, şekil 2.7'de şematik olarak gösterilmiştir (Hornbogen, 1988). Başlangıçta $T = T_1 < M_f$ sıcaklığında tamamen martensit yapıda olan numuneye sabit bir zor uygulanmaktadır. Bu şartlar altındaki numunenin sıcaklığı yükseltildiğinde $A_s - A_f$ sıcaklık aralığında büyük bir şekil değişimi meydana gelir. Bu esnada başlangıçta martensit yapıya sahip olan numune tamamen austenit yapıya dönüşmüştür. Sıcaklığın $T_1 < M_f$ olacak şekilde düşürülmesiyle (yani numunenin soğutulmasıyla) $M_s - M_f$ sıcaklık aralığında numune tamamen martensit yapıya dönüşür. Böyle bir numuneye soğutma ve ısıtma işlemlerinin ard arda uygulanmasıyla ortaya çıkan olay, çift yönlü şekil hatırlama olayıdır. Burada dikkat edilirse, zorlanmanın varlığı sadece sıcaklığa bağlıdır.

Şekil hatırlamalı alaşımlardaki dönüşümün kristaloğrafik açıdan tersinirliği, termoelastik dönüşümün veya martensit dönüşümün belirgin bir özelliğidir. Bundan dolayı şekil hatırlama olayı, termoelastik martensit dönüşümü gösteren alaşımlarda ortaya çıkar (Perkins ve Sponholz, 1984).



Şekil 2.7. Şekil hatırlamalı alaşımlarda termomekanik olarak çift yönlü şekil hatırlama olayının sıcaklık-zorlanma eğrisi.

2.3. Dönüşümün Kristalografisi

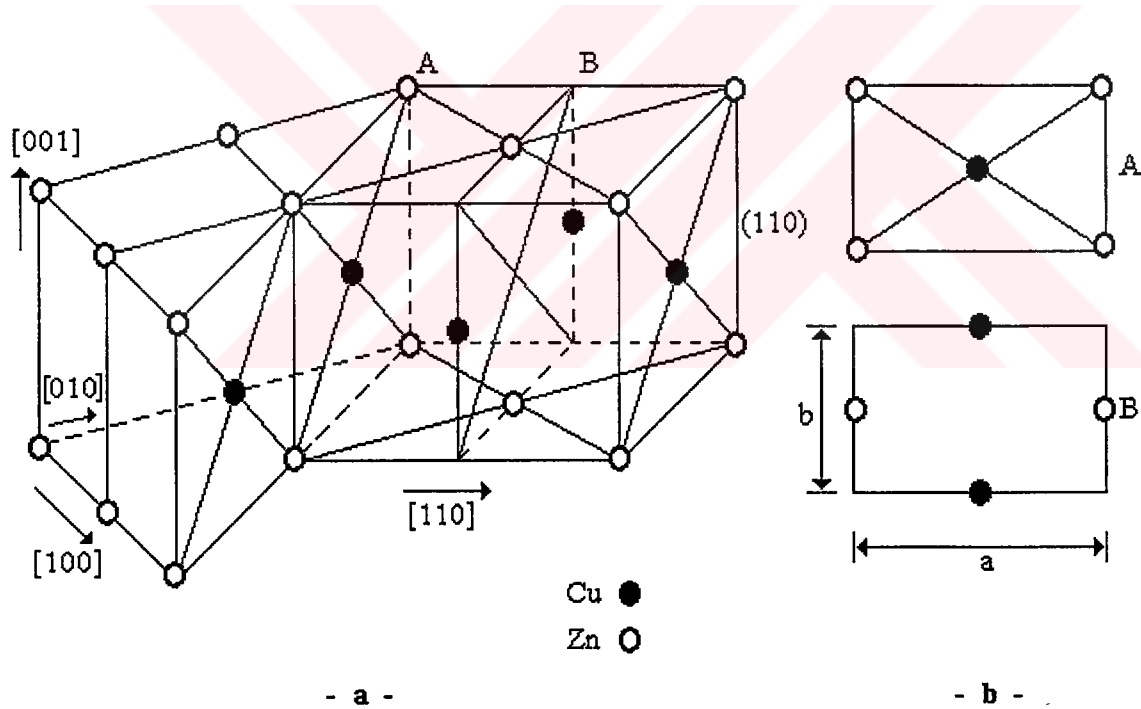
Martensit dönüşümü, difüzyonsuz tabiatının yanısıra bir kristal yapıdan yeni bir kristal yapıya dönüşümle karakterize edilir. Katılarda, austenit fazdaki kristal yapı dönüşümle difüzyonsuz olarak martensit faz olarak adlandırılan yeni bir kristal yapı kazanır. Austenit fazdaki B2 ve DO₃ tipi kristal yapılar martensit dönüşüm sonrası fcc, ortorombik veya hegzagonal yapılara dönüşür. Burada ortorombik yapının (martensit yapı) temel düzlemi, bcc yapının (austenit yapı) {110} düzlemlerinden biri üzerine oturtulmuştur. Austenit yapının {110} düzlemlerinden biri martensit yapının temel düzlemi olan {001} düzlemleridir. Eğer oluşan martensit yapının birbirini takip eden her bir düzleminde bazı yerdeğıştirmeler olursa 2H , 3R , 6H , 9R , 18R tipi martensit yapılar meydana gelir (Warlimont ve Delaey, 1974).

B2 tipli düzenli bir yapıya örnek olarak şekil 2.8’de görüldüğü gibi, CuZn alaşımındaki (110) düzleminde A ve B tabakaları verilebilir. Bu tabakalara deformasyon uygulanırsa yukarıda bahsedilen yapılar elde edilir (Kubo ve Hirano, 1973)

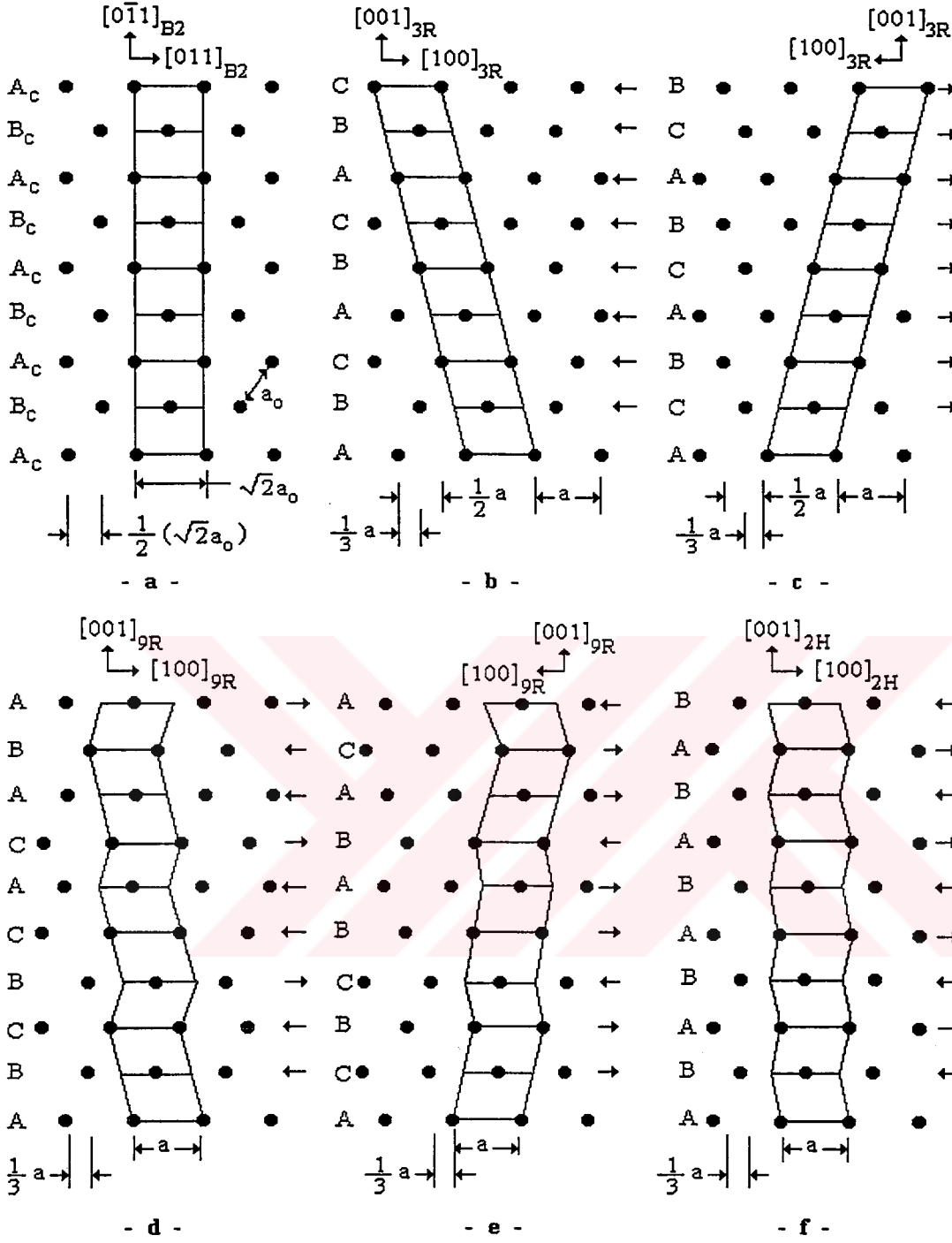
Ana fazın (011)β temel düzlemleri ve (001) martensit düzlemlerinin yığılma düzeni şekil 2.9’da verilmiştir. İki bitişik düzlem arasındaki relatif yerdeğıştirme $1/2(\sqrt{2} a_0)$ ’dır. Eğer örgüye (011)_{B2}’de, [011] yönünde bir kesme uygulanırsa

3R(ABC) yapısı elde edilir ve şekil 2.9 b’de görüldüğü gibi her düzlemde $(1/3)a$ ’lık bir kayma görülür. Ana fazın (011) baz düzlemleri üzerinde $-(1/6)a$ ve $(1/6)a$ kesmelerinden birincisi ard arda iki tabakada uygulandıktan sonra ikinci kesme uygulanır ve bu sıra temel düzlemler üzerinde periyodik şekilde devam ederse ABCBCACAB şeklindeki 9R martensit yapı oluşur (Saburi, vd., 1979). Görüldüğü gibi 3R yapısında $[001]_M$ doğrultusunda C boyunca üç ara düzlem, 9R’de dokuz ve 18R’de ise onsekiz ara düzlem vardır.

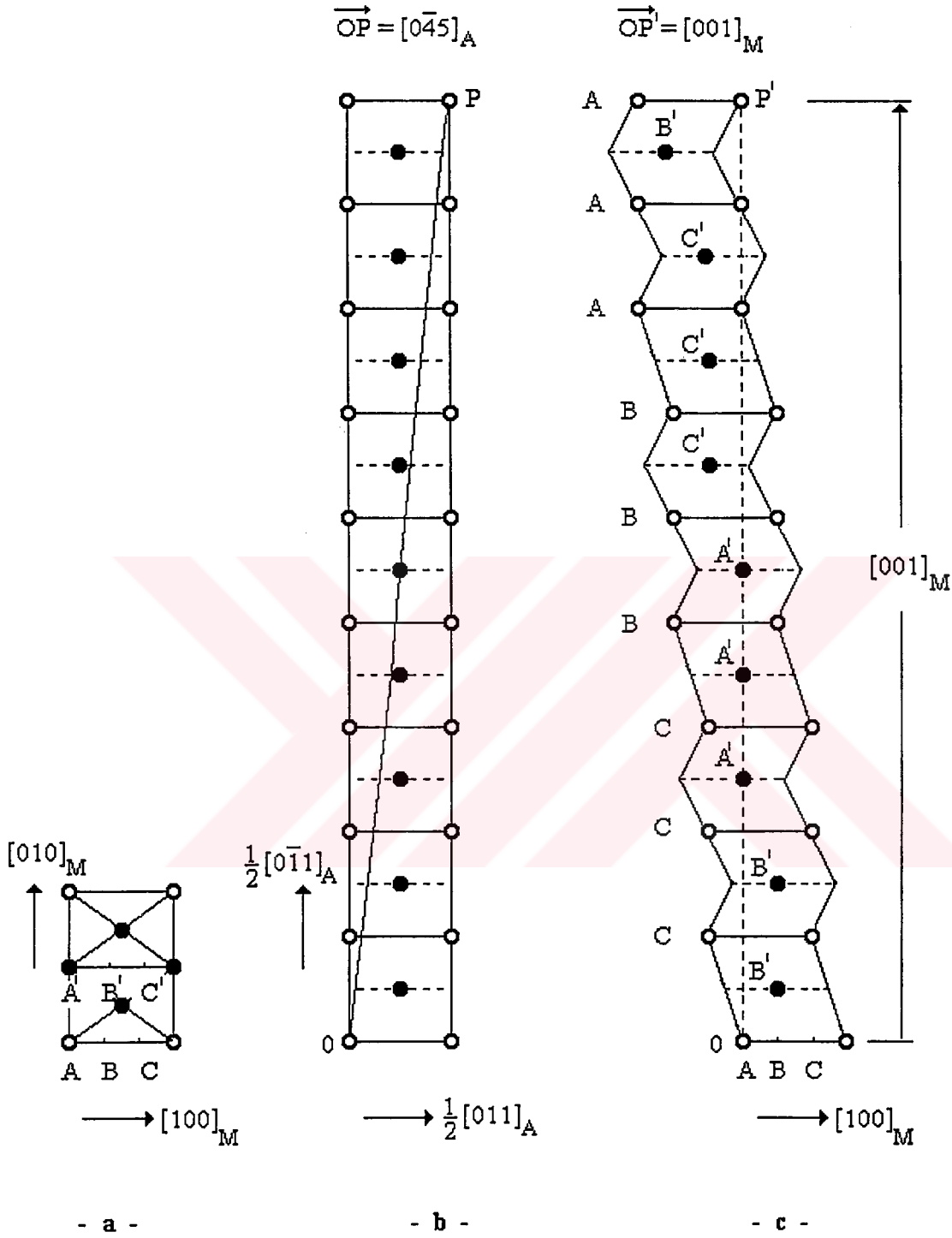
DO₃ düzenine sahip kristal yapıdan 18R tipi martensit yapının nasıl meydana geldiği şekil 2.10’da görülmektedir. Martensit yapının $(001)_M$ temel düzlemi austenit yapının $(0\bar{1}1)_A$ temel düzleminde meydana gelir. Burada martensitik yapı, $[011]_A$ yönündeki bir kesme uygulanmasıyla oluşur. Diğer doğrultular arasındaki bağıntı $1/2[011]_A$ dan $[100]_M$, $[\bar{1}00]_A$ dan $[010]_M$, $[0\bar{4}5]_A$ dan $[001]_M$ meydana gelir (Otsuka ve Shimizu, 1986; Andrade ve Delaey, 1984).



Şekil 2.8. B2 fazının temel yapısı ve (110) düzleminde AB tabakalarındaki atom görünüşleri.



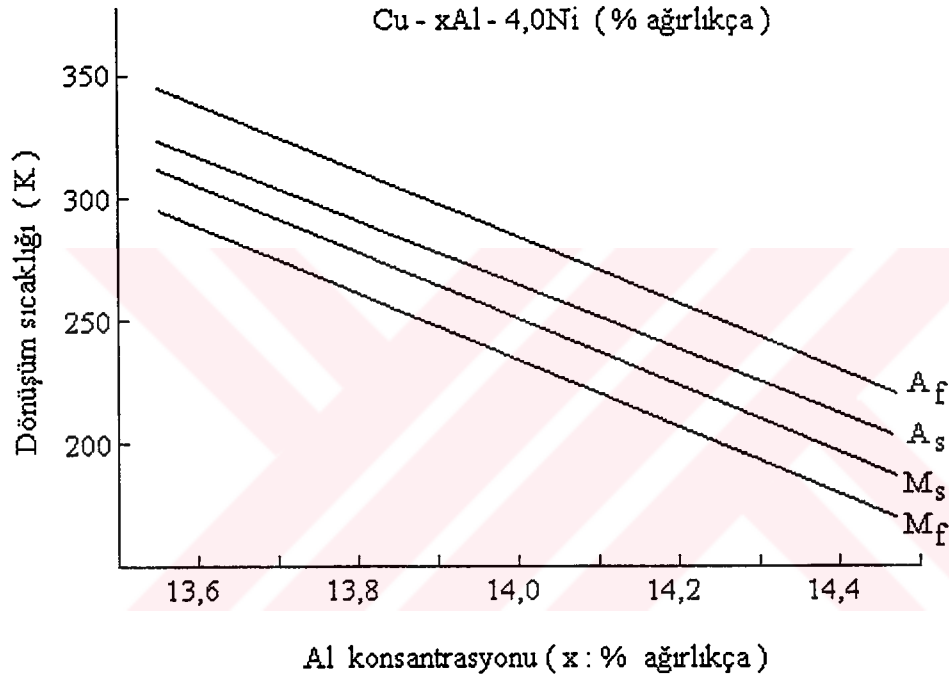
Şekil 2.9. Ana faz $(0\bar{1}1)\beta$ ve martensit fazın (001) düzlemlerinin yığılım düzeni a) B2, b) 3R(ABC), c) 3R(ACB), d) 9R(ABCBCACAB), e) 9R(ACBCBABAC), f) 2H(AB)



Şekil 2.10. $DO_3 \rightarrow 18R$ dönüşümü, a) Martensit temel düzlemi, b) DO_3 yapısında (110) düzlemlerinin sıralanışı, c) 18R martensit yapısında (001) düzlemleri.

2.4. Dönüşüm Sıcaklıkları

Bakır-bazlı alaşımların dönüşüm sıcaklıkları, alaşımların soğutma hızına bağlı olduğu kadar kompozisyonlarına da bağlıdır. Şekil 2.11'de sabit %4 (ağırlıkça) Ni konsantrasyonlu Cu-Al-Ni alaşımlarında dönüşüm sıcaklıklarının Al konsantrasyonuyla değişimi verilmiştir. Al konsantrasyonu arttıkça dönüşüm sıcaklıklarının azaldığı görülmektedir (Funakubo, 1987).



Şekil 2.11. Cu-Al-Ni alaşımlarında Al konsantrasyonuna bağlı olarak dönüşüm sıcaklıklarının değişimi (Funakubo, 1987).

3. TERMOELASTİK MARTENSİTİK DÖNÜŞÜM GÖSTEREN ALAŞIMLARIN ELEKTRİKSEL İLETKENLİK DEĞİŞİMLERİ

3.1. Özdirenç ve Elektriksel İletkenlik

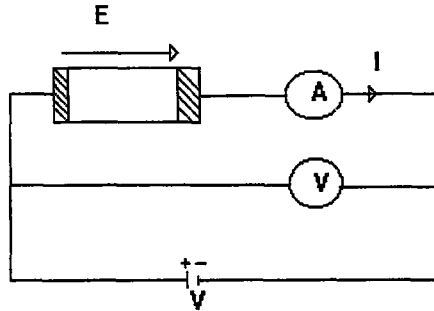
Bir maddenin elektriksel iletkenliği ve özdirenci, o madde de atom başına düşen serbest elektrik yükü sayısı ile belirlenir (Serin, 1990). Serbest elektrik yükünün madde ortamında hareket edebilme yeteneğini ifade eden hareketlilik yani "mobilité" elektriksel iletkenliğin belirlenmesinde rol oynayan başka bir parametredir. Hareketlilik, elektrik alanı başına serbest elektrik yükünün hızı olarak tanımlanır. Serbest elektrik yükünün içinde hareket ettiği elektrik alanı E ile, elektrik yükünün hızı v ile gösterilirse hareketlilik;

$$\mu = \frac{v}{E} \quad (3.1)$$

olarak yazılır. Burada μ ' nün birimi $\text{cm}^2/\text{volt-sn}$ 'dır. Şekil 3.1'deki maddeye V gerilimi uygulanırsa madde içerisindeki E alanı oluşur. Bir iletken içerisindeki serbest elektron yükleri bu elektrik alanı içerisinde hareket ederek J akım yoğunluğunu oluşturur. Elektrik alanının akım yoğunluğuna oranı o maddenin özdirenci olarak tanımlanır ve özdirenç;

$$\rho = \frac{E}{J} \quad (3.2)$$

eşitliği ile verilir ve birimi ohm-cm 'dir.



Şekil 3.1 Bir maddeye uygulanan V gerilimi, içerisinde oluşan E alanı ve geçen I akımı

Maddenin elektriksel iletkenliği elektrik alanı başına düşen akım yoğunluğu olarak tanımlanır. Bu aynı zamanda öz direncin tersine eşittir ve elektriksel iletkenlik

$$\sigma = \frac{J}{E} \quad (3.3)$$

olarak verilir. Birimi ise $(\text{ohm-cm})^{-1}$ dir (Kittel, 1976).

Maddenin uçlarına uygulanan gerilime bağlı olarak oluşan J akım yoğunluğu .

$$J = q n v \quad (3.4)$$

bağıntısıyla ifade edilir. Burada q elektrik yükü, n birim hacimdeki yük sayısı v elektrik yükünün hızıdır. Elektriksel iletkenlik ise;

$$\sigma = q n \mu \quad (3.5)$$

hareketlilik cinsinden elde edilir. Bir iletkenin öz direnci, o iletkenin iletkenliğinin tersi olarak

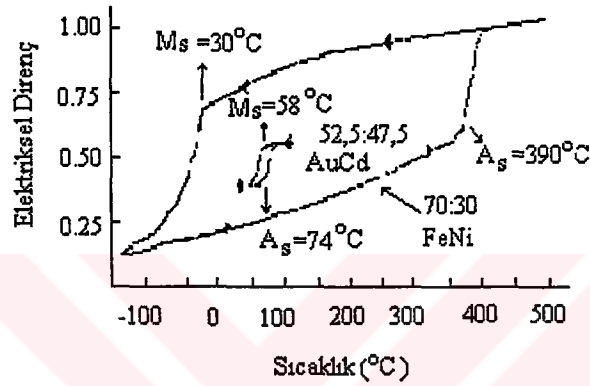
$$\rho = 1/\sigma \quad (3.6)$$

ile ifade edilir.

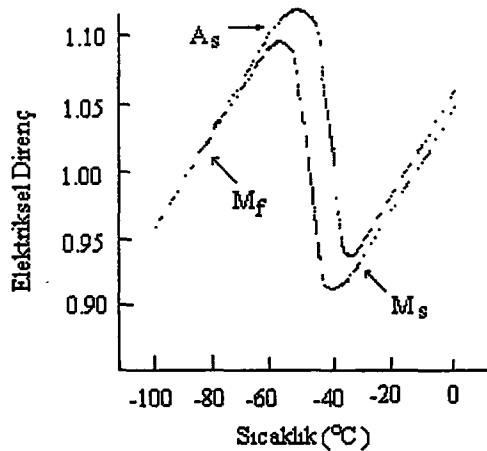
3.2. Martensitik Dönüşüm Gösteren Alaşımlarda Elektriksel İletkenlik

Martensitik dönüşüm gösteren alaşımlar, sıcaklığa, zora ve termal çevrimlere karşı oldukça hasas olup, parametrelerinde değişmeler olmaktadır (Aydoğdu, 1995). Martensitik dönüşüm gösteren alaşımların elektriksel iletkenlikleri sıcaklık, zor, yaşlandırma ve termal çevrim ile değişir. Fe-%30Ni ve Au-%47.5Cd alaşımlarının elektriksel iletkenliklerinin sıcaklığa karşı değişimleri şekil 3.2’de görölmektedir. Burada göröldüğü gibi ters dönüşüm martensitik dönüşümle birleşmektedir. FeNi alaşımlarının dönüşüm sıcaklığı (A_S-M_S) histeresisi oldukça geniştir. FeNi alaşımlarının dönüşüm sıcaklık histeresisi yaklaşık 400°C ’dir (Funakubo, 1987). AuCd alaşımlarında ise dönüşüm sıcaklığı histeresisi oldukça küçüktür. Bu değer yaklaşık 15°C ’dir. Sürücü kuvvete ve kimyasal olmayan serbest enerjiye ihtiyaç duyulduğunda dönüşüm histeresisinin, FeNi alaşımlarında büyük AuCd alaşımlarında daha küçük olduğu görülür. Büyük histeres gösteren FeNi alaşımlarını termoelastik olmayan bir martensit dönüşümü, küçük histeres gösteren AuCd alaşımlarını termoelastik bir martensit dönüşüm gösterir.

Cu-Zn alaşımında, termoelastik martensitik dönüşümü esnasında elektriksel direnç değişimi şekil 3.3'de verilmiştir (Wechsler, 1985). Dönüşüm, M_s sıcaklığında alaşım içinde kimyasal serbest enerjinin en düşük olduğu noktalarda plakalar teşekkül etmek suretiyle başlar. Sıcaklık düşüşüyle mevcut plakalar büyüdüğü gibi bunlara yenileri eklenererek bu işlem, kristal tamamen ürün faza dönüşünceye kadar devam eder. M_f (martensitik bitiş sıcaklığı) dönüşümün tamamlandığı sıcaklıktır. Numune $T > A_f > A_s$ sıcaklığına kadar ısıtılırsa ters dönüşüm meydana gelir. Martensit plakalarından başlamak kaydıyla ters dönüşümün etkisi ile austenit yapı elde edilir. Yapıdaki bu dönüşümler esnasında numunelerin elektriksel diren leride değişir.



şekil 3.2. FeNi (termoelastik olmayan) ve AuCd (termoelastik olan) alaşımlarda martensit dönüşümlerinin histeresis eğrileri (Funakubo, 1987).



şekil 3.3. Cu-%38.8 Zn alaşımında termoelastik dönüşümde elektriksel direncin sıcaklıkla değişimi (Wechsler, 1985).

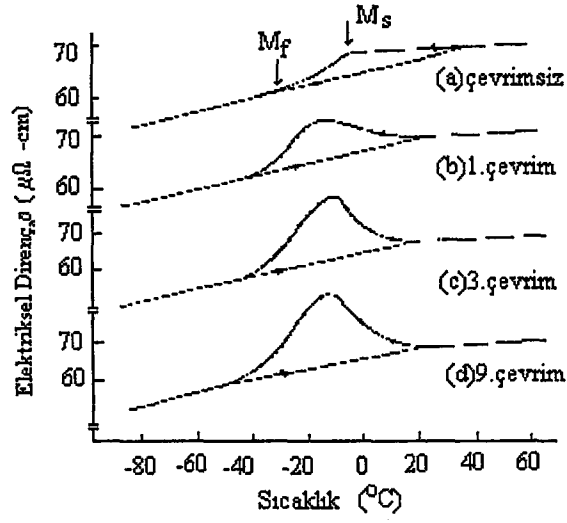
3.3. Elektriksel İletkenliklerin Sıcaklığa Bağlı Değişimleri

Martensitik dönüşüm gösteren alaşımların elektriksel iletkenlikleri sıcaklık değişimlerine karşı oldukça duyarlıdır. Sıcaklık artışı ile elektriksel dirençlerinde artış gözlenir. Aynı zamanda termal çevrimler uygulandığında yine elektriksel direnç değişir. Bu durumda meydana gelen histeresis çevrim sayısının artışı ile büyür (Funakubo, 1987).

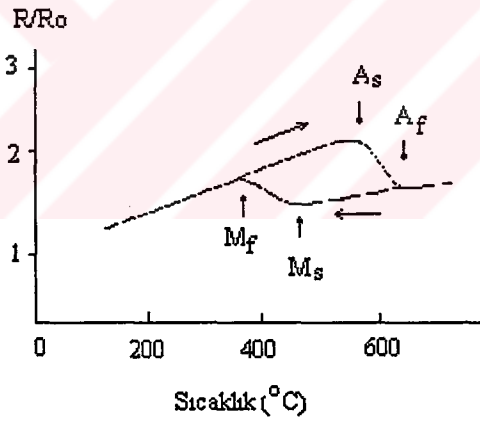
TiNi bazlı alaşımlarda (Ti-50.8 at %Ni) 960 °C de 3 saat su ile soğutma tekniği kullanılarak elde edilen elektriksel direnç-sıcaklık değişimleri şekil 3.4'te verilmiştir. (a) eğrisi numunenin su ile soğutma sonucu elde edilen standart direnç eğrisidir. M_s noktasında elektriksel direnç azaldığı görülür. A_s noktasının geçtiği sıcaklıkta direnç değişimi çok az olur. Eğer numune -20 °C ve 30 °C sıcaklıkları arasında tekrar tekrar ısıtılıp soğutulursa elektriksel direnç birinci çevrimden sonra artar. Dokuzuncu çevrimden sonra (d)'de görüldüğü gibi büyük bir histeresis verir. -20 °C sıcaklığının altındaki ve 30 °C sıcaklığının üstündeki sıcaklıklardaki yapılan çevrimler "Tamamlanmamış sıcaklık eğrisi" olarak tanımlanır. Çünkü martensitik dönüşüm ile ters dönüşüm soğutma ve ısıtma esnasında çevrimi tamamlayamaz. -120 °C ile 60 °C sıcaklıkları arasında eğer termal çevrim tamamlanmış ise her iki dönüşüm de tamamlanmıştır (Funakubo, 1987).

Eşit atomlu ZrRh alaşımı ile yapılan bir başka çalışmada ise elektriksel iletkenliğinin sıcaklığa bağlı değişimi incelenmiştir (Nemonshkalenko vd., 1995). Sıcaklığa bağlı elektriksel iletkenlik değişimi şekil 3.5'te verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi dönüşüm sıcaklıkları $M_s = 480$ °C, $M_f = 350$ °C, $A_s = 570$ °C ve $A_f = 680$ °C'dir. Meydana gelen sıcaklık histeresis 200 °C büyüklüğündedir. Sıcaklık artarken austenit fazın başlama noktası A_s ile bitiş noktası A_f arasında R/R_0 değerinde bir düşüş gözlenmiş ve yapı tamamen austenite döndükten sonra R/R_0 oranı tekrar artmaktadır.

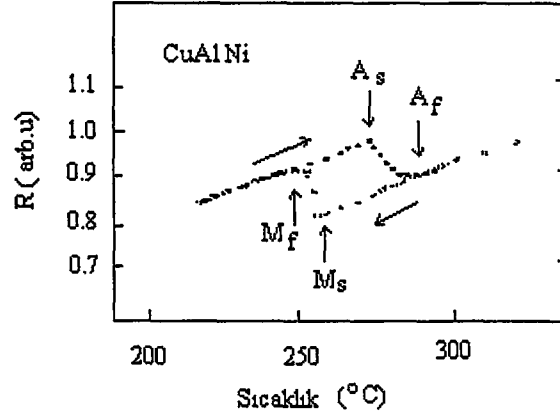
Sıcaklık azalırken martensitik fazın başlama noktası ile bitiş noktası arasında R/R_0 oranı artış göstermiş ve tekrar düşmeye başlamıştır.



Şekil 3.4. TiNi alaşımlarının elektriksel iletkenliğinin sıcaklığa bağlı değişimleri (Funakubo, 1987).



Şekil 3.5. ZnRh alaşımlarının sıcaklığa bağlı elektriksel iletkenliğinin (R/R_0) değişim karakteristiği (Nemonshkalenko, vd., 1995).



Şekil 3.6. CuAlNi alaşımasının sıcaklığa bağlı elektriksel iletkenlik değişimi karakteristiği (Morii, vd., 1985).

CuAlNi (%69.2 Cu, %25.4Al, %5.4 Ni) alaşımasının elektriksel iletkenliğinin sıcaklığa bağlı değişimi dört prop metodu kullanılarak incelenmiştir. CuAlNi alaşımasının sergilediği elektriksel iletkenlik karakteristiği şekil 3.6’da verilmiştir (Morii, vd., 1985).

CuAlNi alaşımasının sergilediği bu dönüşüm martensitik dönüşüm karakteristiğidir. Martensitik dönüşüm sıcaklıkları M_s , M_f , A_s ve A_f sırası ile 256 K, 248 K, 275 K ve 298 K’dir. İkinci bir soğutmada M_s değeri 261 K olmuştur. Ancak M_s değişmesine rağmen histeresis şekli değişmeden kalmıştır.

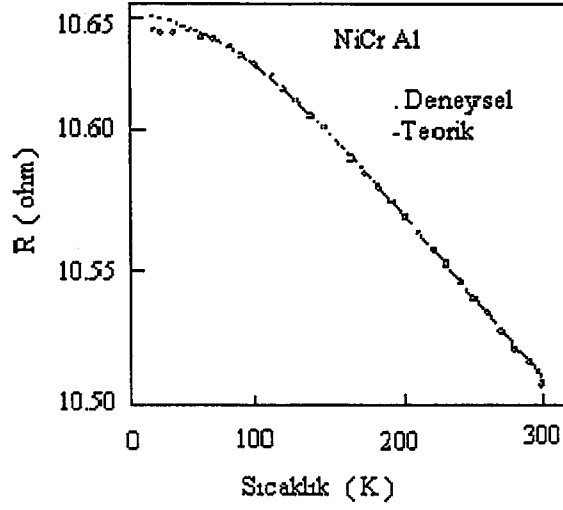
NiCrAl alaşımı ile yapılan bir başka çalışmada ise 4.2 K ve 300 K sıcaklıkları arasında sonsuz elektriksel direnç ölçülmüştür (Hight ve Plough, 1983). Direnç-sıcaklık eğrisi şekil 3.7’de verilmiştir. 50 K sıcaklığı civarındaki küçük farklılık ihmal edilirse, grafikten negatif katsayılı bir direnç eğrisinin oluştuğu görülmüştür.

Bu eğri teorik olarak;

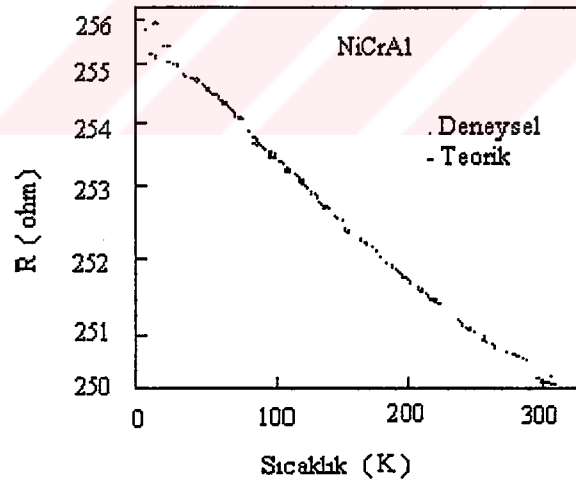
$$R=R_0[1-C\ln(T^2+\Delta^2)] \quad (3.7)$$

ile ifade edilmiştir ve deneysel datalar kullanıldığında teorik ve deneysel verilerin uyduğu görülmüştür. Burada $C=0.01349$ ve $\Delta=254$ K alınmıştır.

Aynı alaşım 340 K de 6 saat yaşlandırıldığında sıcaklık direnç eğrisinde de değişme gözlenmiştir (şekil 3.8). Yaşlandırma sonucunda direnç değerleri daha da büyümüş ve yaşlandırılmış haldeki numunede 50 K civarında görülen farklılık ortadan kaldırılmıştır. Bu grafikten elde edilen değerler, $R=R_0[1-C\ln(T^2+\Delta^2)]$ denklemine uygundur. Ancak burada $C=80535.10^{-3}$ ve $\Delta=107$ K’dir.



Şekil 3.7. NiCrAl alaşımının sıcaklığa bağlı elektriksel iletkenlik değişim karakteristiği (Hight ve Plough, 1983).

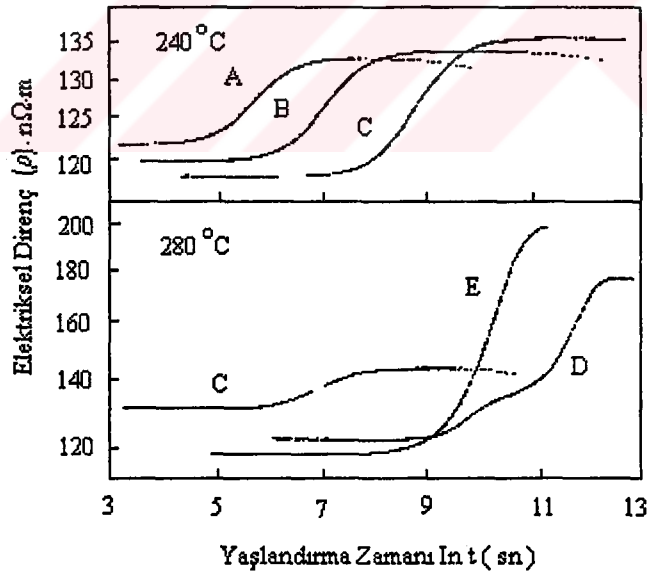


Şekil 3.8. 340 °C de 6 saat yaşlandırılan NiCrAl alaşımının sıcaklığa bağlı elektriksel iletkenlik değişim karakteristiği (Hight ve Plough, 1983).

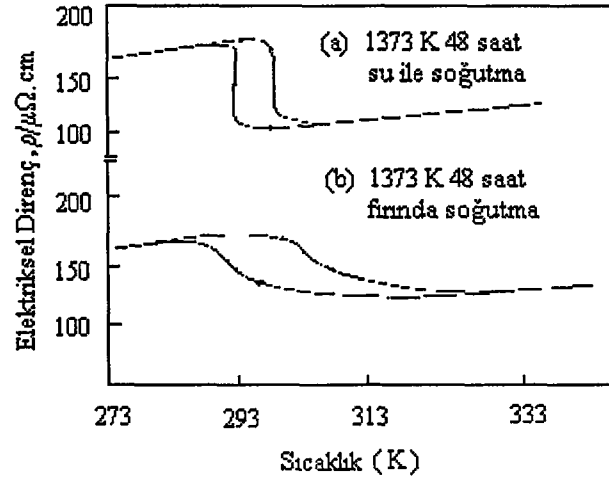
3.4. Elektriksel İletkenliklerin Yaşlandırmaya Bağlı Değişimleri

Martensitik dönüşüm gösteren alaşımların, yaşlandırma ile elektriksel iletkenliklerinde de değişimler meydana gelir. Farklı atomik yüzdeli Cu-Zn-Al alaşımları ile yapılan elektriksel direnç-sıcaklık eğrileri yaşlandırma sıcaklığına bağlı olarak şekil 3.9'da verilmiştir (Lee ve Kim, 1990). 240 °C'den 280 °C'ye kadar farklı sıcaklıklarda yaşlandırılan numunelerin elektriksel dirençlerinde yaşlandırma sıcaklığı ile bir artış gözlenmiştir.

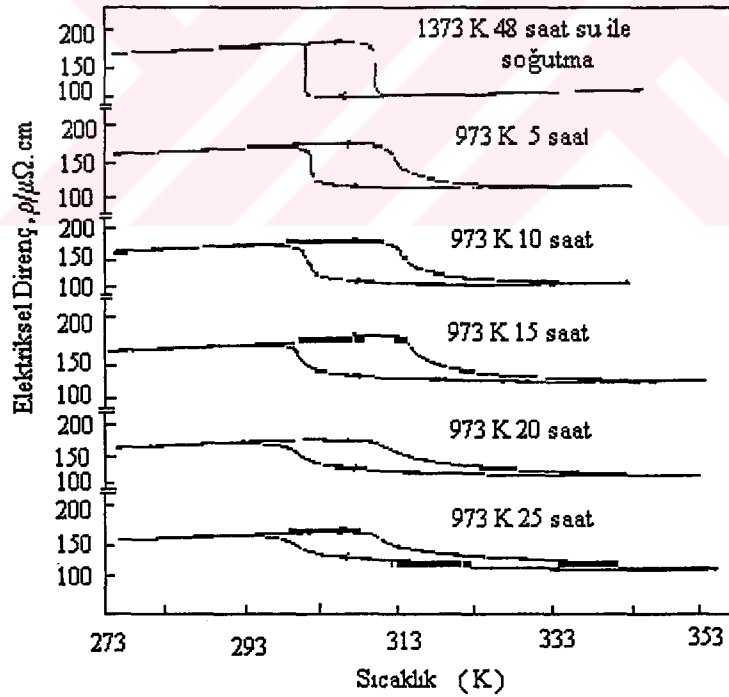
Bir başka çalışmada ise alaşımların geçiş sıcaklıkları elektriksel direnç ölçümleri ile incelenmiştir (Oshima, vd., 1992). FeRh alaşımının (% 50.5 Fe, %49.5 Rh) su ile ani soğutma ve fırın içerisinde soğutma teknikleri kullanılarak elektriksel iletkenliğinin sıcaklığa bağlı değişimleri incelenmiştir. Bu iki farklı teknikten elde edilen elektriksel iletkenliğin sıcaklığa bağlı değişimi şekil 3.10'da verilmiştir. Şekil 3.10 (a)'da 1373 K sıcaklığında 48 saat yaşlandırılan ve su ile ani soğutulan FeRh alaşımının karakteristiğidir. Şekil 3.10 (b)'de ise 1373 K sıcaklığında 48 saat yaşlandırılan fırın sisteminde soğutulan FeRh alaşımının sergilediği elektriksel direnç karakteristiğidir.



Şekil 3.9. Cu -Zn-Al elementlerinin farklı atomik yüzdelerde alınarak oluşturulan alaşımların 240 °C ve 280 °C'de termal yaşlandırmaya bağlı elektriksel iletkenlik değişim karakteristiği (Lee ve Kim, 1990).



Şekil 3.10. Fe-50.5%Rh alaşımının sıcaklığa bağlı elektriksel iletkenliğinin değişimi (a) su ile soğutulularak, (b) fırında soğutulularak (Oshima, vd., 1992).



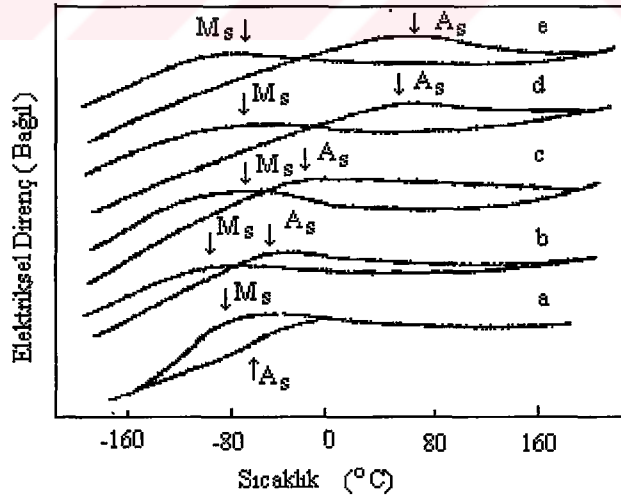
Şekil 3.11. FeRh (Fe-50.5%Rh) alaşımının farklı zamanlar için 973 K de yaşlandırmaya bağlı elektriksel direnç eğrisi (Oshima, vd., 1992).

Su ile soğutma tekniğinde patlama (burst) reaksiyonu sergilenmiştir. Dönüşümün başlama ile bitiş sıcaklığı arasında 10 K gibi küçük sıcaklık aralığında olmuştur. Bu olay Cu-Zn alaşımının martensit dönüşümüne benzemektedir. Fırın içinde yapılan soğutma dönüşümü yavaş meydana gelmektedir.

973 K de yaşlandırılan numune su ile soğutma sonucunda ortaya koyduğu karakteristiği fırında soğutulan modelin verdiği karakteristiğe benzemektedir (şekil 3.11). Sıcaklık histeresisi yaşlandırma zamanının artması ile daha geniş bir hal alır. Yaşlandırma zamanı 20 saatin üzerine çıktığında histeresiste değişme olmamıştır.

3.5. Elektriksel İletkenliklerin Uygulanan Zora Bağlı Değişimleri

NiTiNb (%47Ni, %44Ti, %9Nb) şekil hatırlamalı alaşımının zorlanmaya bağlı elektriksel iletkenliğin sıcaklığa bağlı karakteristiği incelenmiştir (Lian, vd., 1992). NiTiNb alaşımı 850 °C'de 30 dakika yaşlandırılarak -60 °C'de farklı zorlar uygulanıp elektriksel iletkenlik sıcaklık eğrisi şekil 3.12 deki gibi bulunmuştur. Martensitin başlama sıcaklığı -85 °C, austenitin başlama sıcaklığı -65 °C'dir. Bu iki sıcaklık farkı 20 °C'dir. Deformasyondan sonra elektriksel direnç sıcaklık eğrisi değişmektedir. Deformasyonla martensitenin ters dönüşüm başlama sıcaklığı (A_s) artar. Küçük zorlanmalarda sıcaklık değişimi az olmuştur. Gerilme zorlanmasındaki %16'lık artma A_s sıcaklık değişimini 60 °C arttırmıştır. Gerilme zorlanmasının %16 lık artışından sonraki artmalar A_s sıcaklığını az miktarda yükseltmiştir.



Şekil 3.12. Ni₄₇Ti₄₄Nb₉ alaşımının elektriksel iletkenliğinin ve dönüşüm sıcaklıklarının uygulanan zora bağlılığı (a) tavlama, (b) ϵ =%8, (c) ϵ =%14, (d) ϵ =%16, (e) ϵ =%20

4. ELEKTRİSEL İLETKENLİK ÖLÇME METODLARI

İletkenlik ölçmek için çeşitli metotlar olmasına rağmen yaygın olan iki prob, dört prob ve değmesiz öz direnç metodundan bahsedilecektir ve ölçümlerde iki prob metodu kullanılacaktır.

4.1. İki Prob Metodu

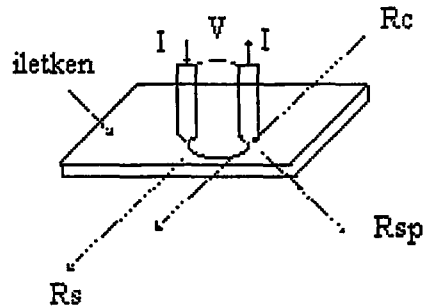
İki prob sistemi, iletkenlerin öz direncini ölçmek için kullanılan metotlardan biridir (Schroder, 1990). İki prob sistemi şekil 4.1’de gösterilmiştir. Problar hem akım hemde gerilim probu olarak kullanılmıştır. İki prob arasındaki toplam direnç aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$R_T = V/I = 2R_C + 2R_{sp} + R_s \quad (4.1)$$

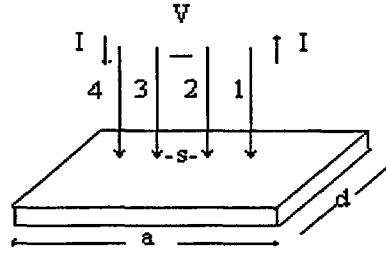
Burada R_C her bir metal probun kontak direncidir. R_{sp} ise her prob altındaki yüzey direncidir ve R_s ’de iletkenin direncidir.

4.2. Dört Prob Metodu

Dört-uçlu prob sistemi 1916 da Wenner tarafından öz direnç ölçümü için tasarlanmıştır. 1954 yılında yarıiletkenlerin öz direncini ölçmek için Valdes tarafından kullanılmıştır (Serin, 1990).



Şekil 4.1. İki prob metodu ile öz direnç ölçüm sistemi



Şekil 4.2. Dört prob sistemi

Problar kullanılırken genellikle prob aralıklarının eşit ve problemlerin aynı çizgi üzerinde olmasına dikkat edilir. Fakat başka şekilde de yerleştirmek mümkündür. Dört-uçlu prob metodunda numunenin geometrisinin kesin olarak bilinmesi gerekir (Schroder, 1990). Örneğin kenarları a ve d olan dikdörtgen bir numune için dört uç şekil 4.2’de görüldüğü gibi yerleştirilir.

Şekil 4.2’de eğer dıştaki 1 ve 4 numaralı uçlardan sabit bir I akımı geçirilirse, içteki 3 ve 2 nolu uçlar arasındaki potansiyel farkı

$$V = \rho I / C (a/d, d/s) \quad (4.2)$$

ifadesi ile bulunur (Schroder, 1990). Burada C bir sabittir. Bunun için hazırlanmış çizelgelerden bulunur. Bu durumda öz direnç

$$\rho = (V/I) \cdot C (a/d, d/s) \quad (4.3)$$

şeklinde verilir W kalınlık olmak üzere öz direnç

$$\rho = (V/I) \cdot WCF \quad (4.4)$$

olur. Burada F , W/s ye bağlı olan bir sabittir, yani düzeltme faktörüdür.

Ölçüm yaparken uçlar arasındaki uzaklık (s) eşit ve uçların yerleşeceği yüzey düz olmalıdır. En uygun prob uzaklıkları 0.5 ve 1.5 mm aralığında ve maksimum prob uzaklıkları da 0.635 mm ve 1.588 mm aralığında olmalıdır (Schroder, 1990). Ölçüm yapılırken dış elektrotlardan iletken bir akım uygulanır ve voltmetreden iç elektrotlar arasında oluşan voltaj okunur. Aşağıdaki bağıntı kullanılarak voltmetreden doğrudan

doğruya okunarak ve gerekli bazı düzeltme çarpanları dikkate alınarak öz direnç tayin edilir.

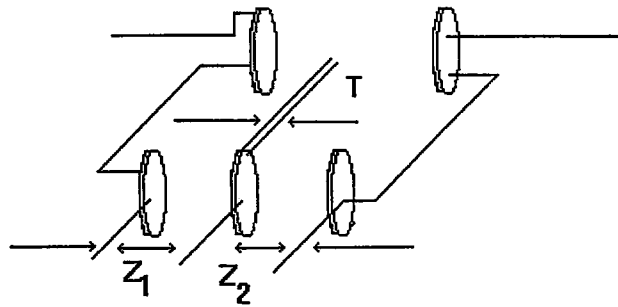
$$\rho = \frac{V\pi}{WI \cdot \ln 2} = 4.5324 \frac{V}{WI} \quad (4.5)$$

Pratikte çok kullanılan bir yöntem olmasına rağmen bazı mahsurlu yanları da vardır. Elektrotlar iletken yüzeye değdirildiğinde sivri uçlar yüzeyde mekanik bir hasar meydana getirebilir (Serin, 1990).

4.3. Değmesiz Öz direnç Metodu

Özdirenç ölçülmesinde kullanılan diğer bir yöntemde " değmesiz öz direnç ölçme yöntemi " veya diğer bir ismiyle "mağnetik indüksiyon " yöntemidir. Şekil 4.3'te görüldüğü gibi değmesiz öz direnç ölçme cihazı beş sarımdan oluşmuştur (Serin,1990).

Özdirenci ölçülecek kristal on sarımlı birincil ve on sarımlı ikincil sarım arasına paralel olarak yerleştirilir. Kristalin uçları arasına değışken mağnetik alana bağılı olarak değışen bir elektrik alanı oluşur. Bu elektrik alanının büyüklüğü söz konusu maddenin elektriksel iletkenliği yani öz direnciyle ilgilidir. Öz direnç ikincil sarımlardan oluşan indüksiyon geriliminin bir ölçüsü olarak belirlenir. Diğer bir anlatımla birincil sarımdan sinüsel bir akım geçirilerek değışken bir mağnetik alan oluşturulur. Sarımlar arasında kristal yokken ikinci sargının uçlarında Maxwell yasasına göre oluşan indüksiyon elektromotor kuvvet yani sinüsel gerilim okunur. Kristal sarımlar arasına yerleştirildiği zaman ikincil sargının uçları arasındaki sinüsel gerilimin değeri kristalin öz direnci oranında değışime uğrar. Bununla ilgili olarak yapılan kalibrasyondan yararlanılarak kristalin öz direnci okunur.



Şekil 4.3. Değmesiz öz direnç ölçme sistemi

5. DENEYSEL İŞLEMLER

Şekil hatırlama olayı gösteren CuAlNi alaşımlarının elektriksel iletkenliği incelendiği bu çalışmada kullanılan alaşım Fransa'dan TREFIMETAUX Centre de Recherche'den sağlandı. Bu CuAlNi alaşımlarından biri 250 mm uzunluğunda 8 mm eninde ve 2 mm kalınlığında bir plaka şeklinde, diğeri ise 250 mm uzunluğunda 4 mm çapında çubuk halindedir. Bu numunelerden biri 7 mm uzunluğunda 5,5 mm eninde ve 1 mm kalınlığında (düz numune), diğeri 4 mm çapında, 1 mm uzunluğunda (yuvarlak numune) olarak hazırlandı. CuAlNi alaşımının kimyasal kompozisyonu tablo 5.1'de verilmiştir ve düz numune Alaşım 1, yuvarlak numune Alaşım 2 olarak adlandırıldı (Burada e/a , elektron/atom oranıdır).

Isıl işleme tabi tutulmamış numunelerin x-ışınları difraksiyon piklerinden (şek 5.1. ve şek.5.2.) numunelerin düzenli bir yapıya sahip olmadıkları görülür (Aydoğdu, 1995). 930 °C'de 30 dakika süre ile ısıtılıp β -tipi düzenli bir yapıya dönüşüm sağlaması için tuzlu-buzlu suda ani soğutulan numuneler x-ışınları difraksiyon piklerinden görüldüğü gibi (şekil 5.3. ve şekil 5.4.) M18R martensitik yapıya dönüşürler.

Alaşım 1 ve Alaşım 2 numunelerinin belirli ısıl işlemlerden sonra mikrografik gözlemlerinin ve elektriksel iletkenliklerinin incelenmesi için aşağıdaki teknikler kullanılarak ölçümler yapıldı.

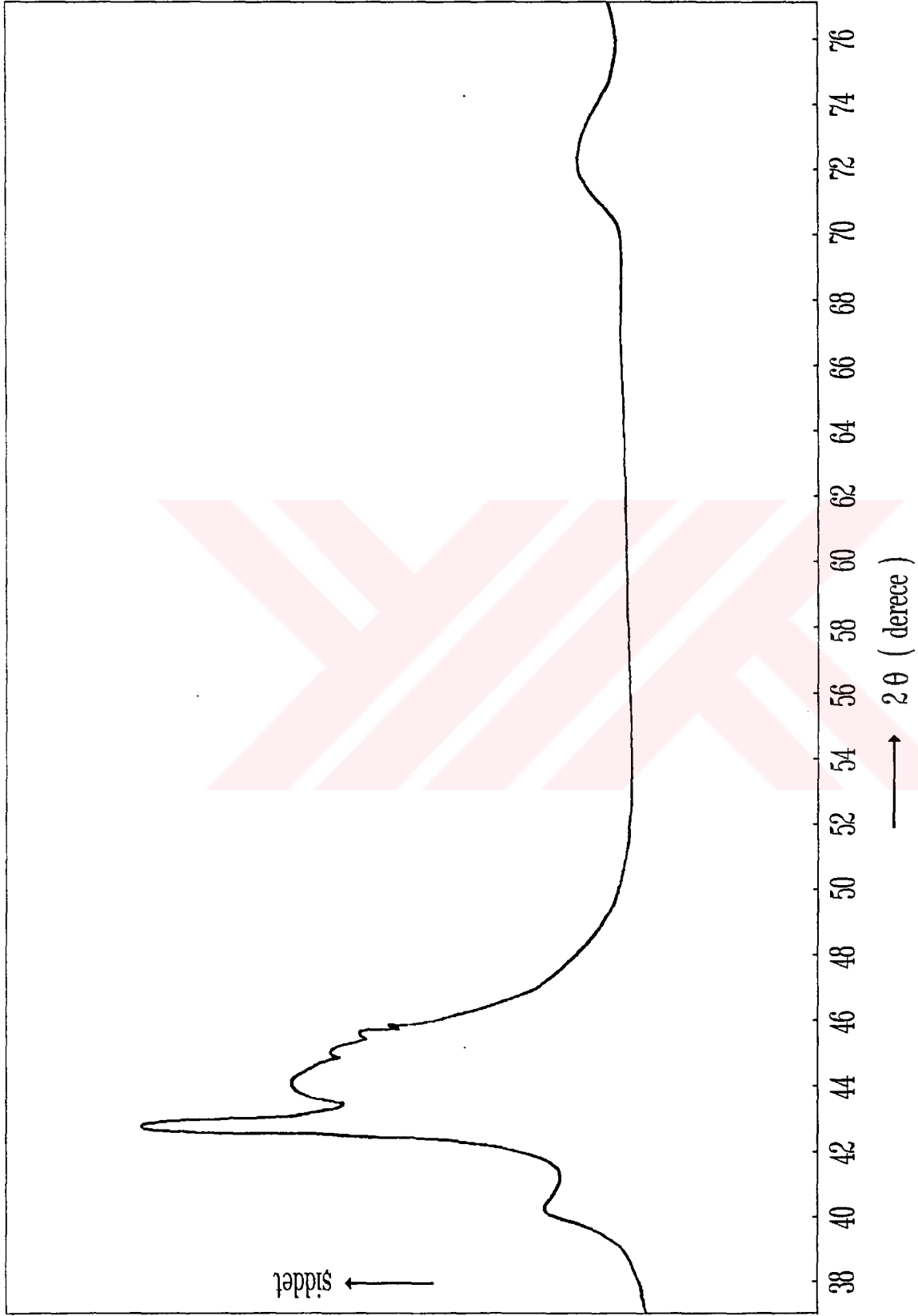
5.1. Isıl İşlemler

CuAlNi alaşımdan parça numuneler elde edilirken kesim esnasında oluşan zorlanma etkisinin kaldırılması ve homojenleşmeleri için numuneler 930 °C'de (β -faz alanında) 30 dakika süreyle ısıtılıp β -tipi martensit yapıya dönüşümün sağlanması için tuzlu-buzlu su içerisine atılarak ani soğutuldular.

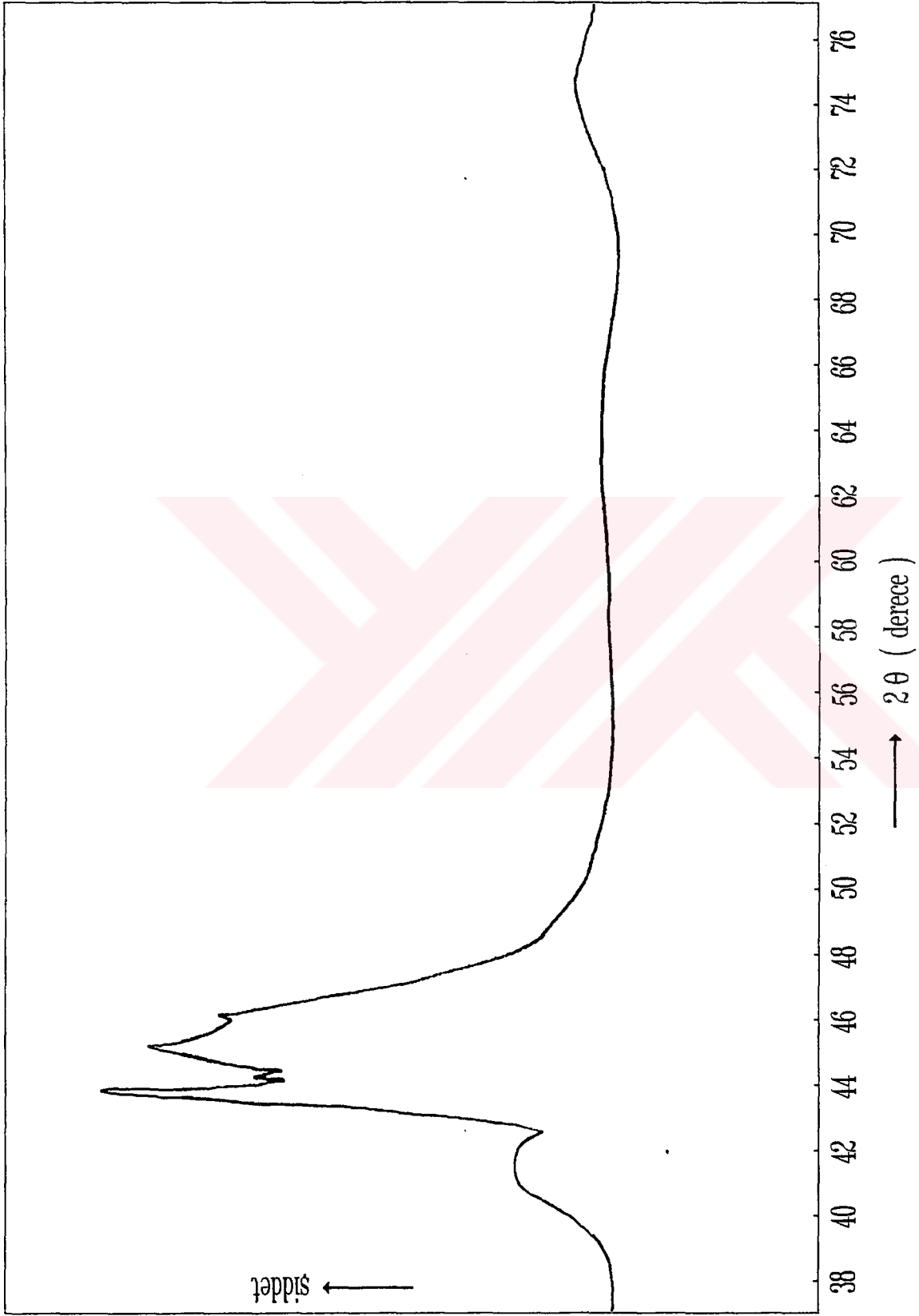
Isıl işlem uygulanan numuneler 200 °C sıcaklığındaki fırın içerisinde 1, 3, 5, ve 7 saat süreyle yaşlandırılma işlemlerine tabi tutuldu.

Tablo 5.1. Alaşım 1 ve Alaşım 2'nin kimyasal kompozisyonları.

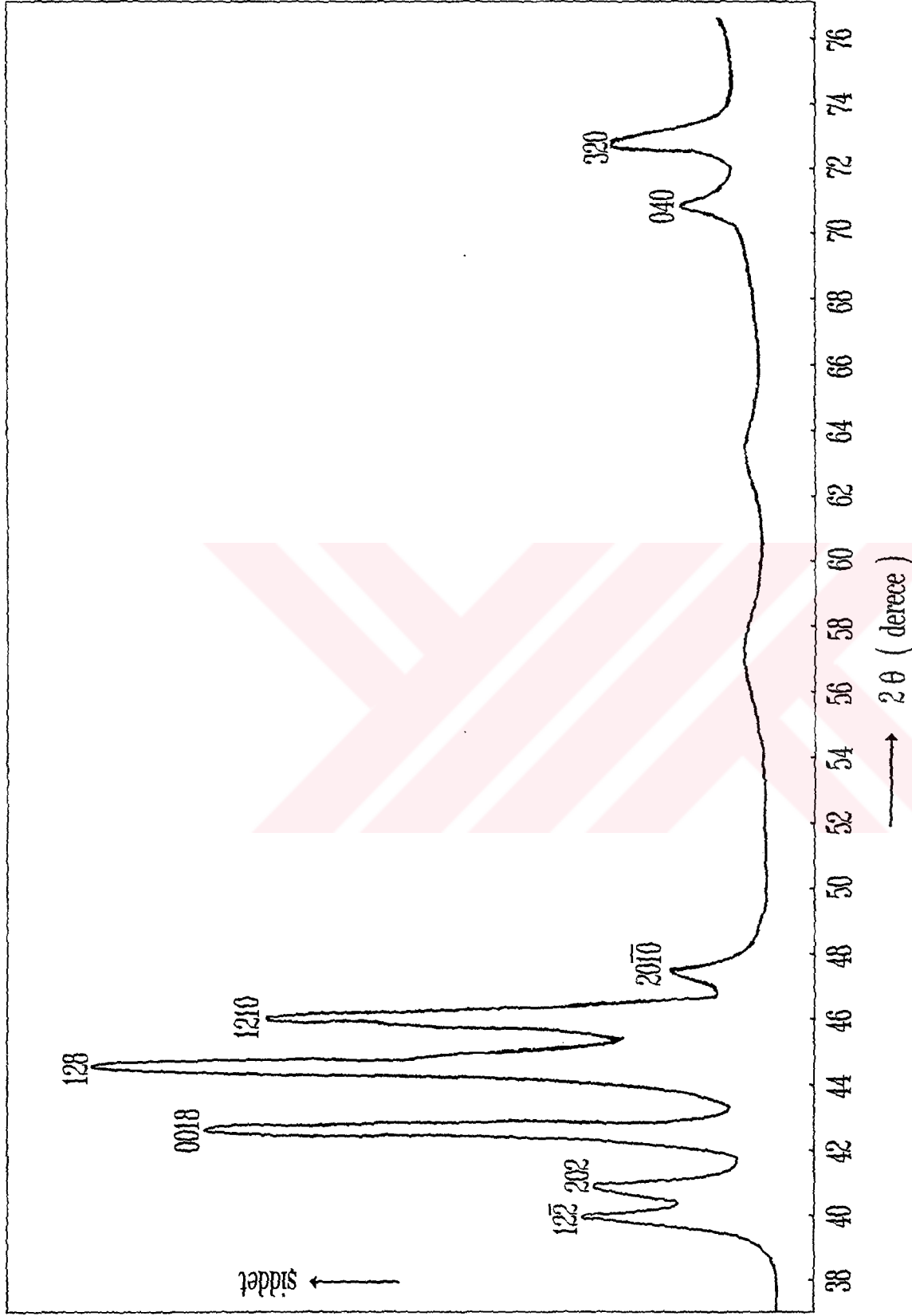
Alaşım No	% ağırlık			% atomik			e/a oranı
	Cu	Al	Ni	Cu	Al	Ni	
1	85,18	11,00	3,82	73,92	22,48	3,58	1,4852
2	85,62	11,00	3,38	74,33	22,49	3,17	1,4814



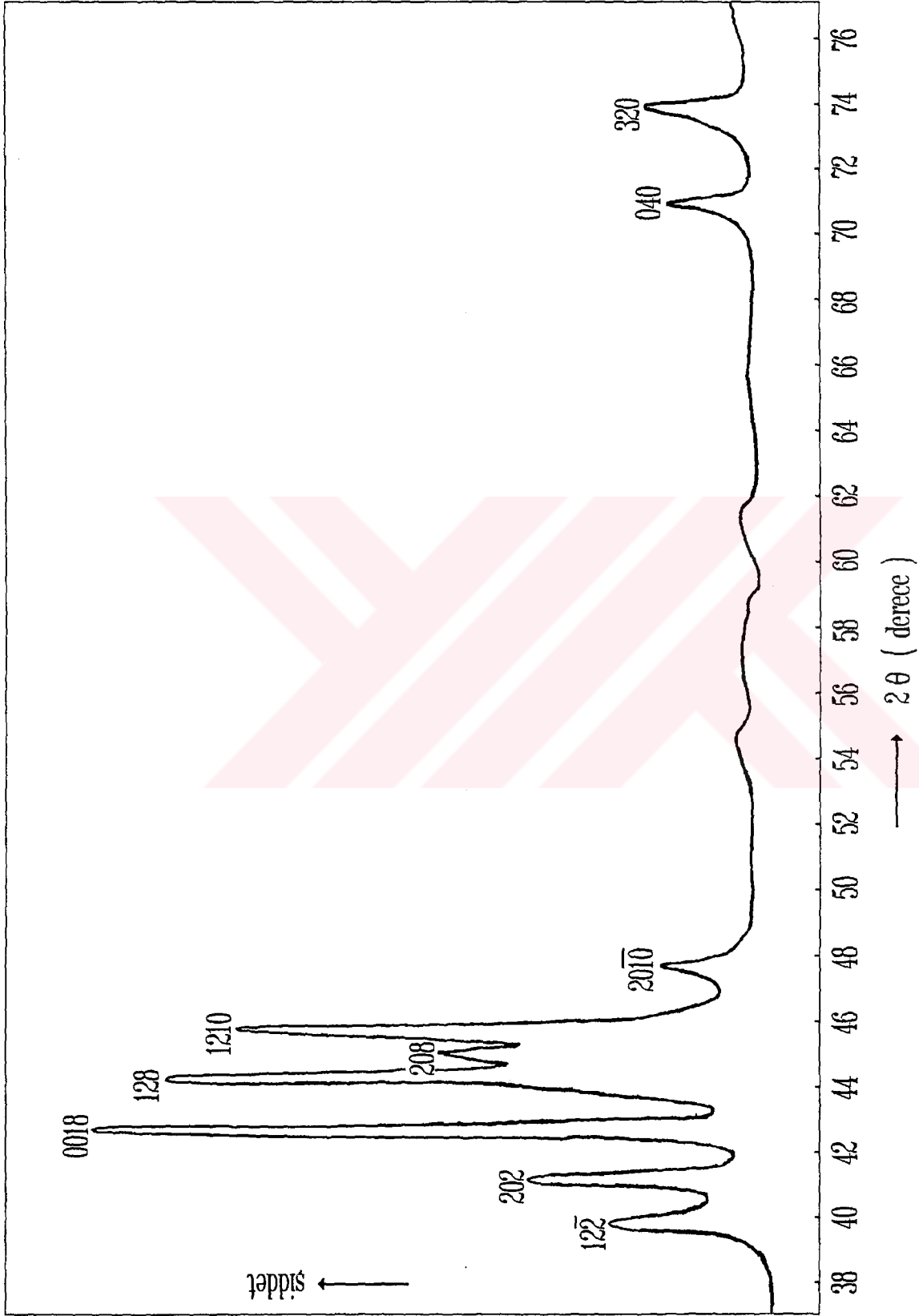
Şekil 5.1. Alaşım 1 numunesinin imal edildikten sonraki orijinal halinden elde edilen tipik x-ışını toz difraktogramı.



Şekil 5.2. Alaşım 2 numunesinin imal edildikten sonraki orijinal halinden elde edilen tipik x-ışını toz difraktogramı.



Şekil 5.3. Hızlı soğutma sonrasında martensitik şartlarda ($T < M_f$) Alaşım 1 numunesinden elde edilen tipik x-ışını toz difraktogramı.



Şekil 5.4. Hızlı soğutma sonrasında martensitik şartlarda ($T < M_f$) Alaşım 2 numunesinden elde edilen tipik x-ışını toz difraktogramı.

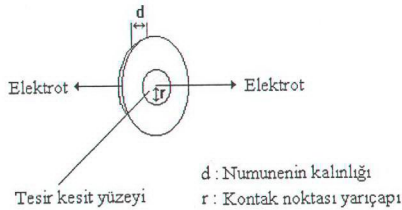
5.2. Metalografik Gözlemler

Alaşımlardan küçük parçalar halinde kesilen numuneler ısıt işlemler kesiminde belirtilen ısıt işlemlere tabi tutuldular. Daha sonra Alaşım 1 ve Alaşım 2'den alınan parçalar ısıt işlemsiz ve ısıt işleminden sonra bakalit içerisine gömülerek yüzeyleri zımparalandı. Yüzeyleri zımparalanan numuneler elmasla (Diament Paste) parlatıldı. Ayrıca yağlayıcı sıvı olarak " Beuhler-Automet Lapping Oil " kullanıldı. Parlatılan bu numuneler 50 gram ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) - 960 ml metanol ve 200 ml HCl çözeltisi ile dağıldıktan sonra optik mikroskobu (Reichert MeF₂) kullanılarak metalografik gözlemler yapıldı.

5.3. Elektriksel İletkenlik-Sıcaklık Ölçümleri

Alaşım 1 ve Alaşım 2 numuneleri ısıt işleme tabi tutulmadan ve ısıt işlem yapıldıktan sonra her iki yüzeyinden gümüş boya (Silver Paste) kullanılarak şekil 5.5.'de görüldüğü gibi 1.0 mm yarıçapında kontak noktaları oluşturuldu.

Hazırlanan numunelerin elektriksel iletkenliğini ölçmek için, numunelere sabit 10 milivolt dc gerilim uygulanarak, sıcaklığa bağlı olarak numunelerden geçen akım 250 K ile 473 K sıcaklık aralığında ölçüldü. Ölçülen akım değerlerinden numunelerin dirençleri hesaplandı. Daha sonra hesaplanan direnç değerleri (R), numunenin son direncine (R_0) bölünerek, R/R_0 -Sıcaklık grafikleri çizildi. Ayrıca numunelerin öz dirençleri



Şekil 5.5. İletkenlik ölçümüne hazır haldeki numunenin şekli

$$\rho = \frac{V \cdot a}{I \cdot d} \quad (5.1)$$

eşitliği ile hesaplandı. Burada I akım, d numunenin kalınlığı, V uygulanan gerilim, a ($a = \pi r^2$) tesir kesit yüzeyidir. İletkenlik σ ise

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (5.2)$$

eşitliği ile hesaplandı.

Aynı işlemler ısıtma işlemi, 1, 3, 5, ve 7 saat yaşlandırılan numunelere de uygulanarak elektriksel iletkenlik ölçümleri yapıldı.

6. ÖLÇÜM SONUÇLARI

6.1. Metalografik Gözlem Sonuçları

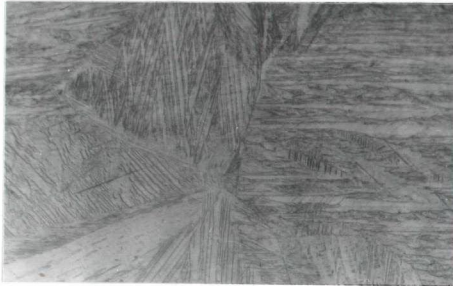
Isıl işlemsiz ve 930 °C'de β faz bölgesinde 30 dakika süre ile homojenleştirildikten sonra tuzlu-buzlu suda soğutulan Alaşım 1 ve Alaşım 2 numunelerinin metalografik gözlemleri yapıldı.

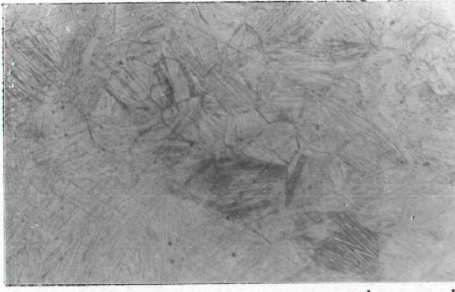
Alaşım 1 ve Alaşım 2'den alınan numunelerin, ısıl işlem uygulanmadan, parlatılıp dağlandıktan sonra optik mikroskopta mikrografları çekildi. Isıl işlemsiz Alaşım 1 ve Alaşım 2'den alınan mikrograflar şekil 6.1'de görülmektedir.

Bu optik mikrograflarda görüldüğü gibi Alaşım 1 de taneler (grainler) ve martensit plakaları görülmektedir. Fakat Alaşım 2 de hiçbir tane görülmemiştir.

930 °C'de β faz bölgesinde 30 dakika süre ile homojenleştirilen ve tuzlu-buzlu suda ani soğutulan Alaşım 1 ve Alaşım 2 numunelerinden alınan mikrograflar ise şekil 6.2'de verilmiştir.

Şekil 6.2.a'da görülen Alaşım 1'in mikrografında taneler çok açık olarak görülmektedir. Martensit plakaları tane sınırlarında keskin bir biçimde kesilmiş ve bazı taneler içinde çok farklı yönelime sahip martensit plakaları olmuştur. Bazı tanelerde V şeklinde bazı tanelerde ise iğne şeklinde martensitler mevcuttur (Ghosh, vd 1986). Şekil 6.2.b'de görülen Alaşım 2'nin yüzey mikrografında martensit plakalarının tane sınırlarında keskin bir biçimde kesildiği ve sağ taraftaki tanede farklı yönelmelere sahip plakaların olduğu görülmektedir.

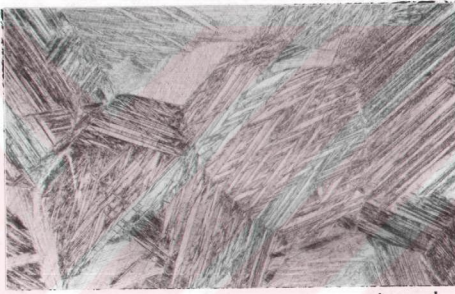




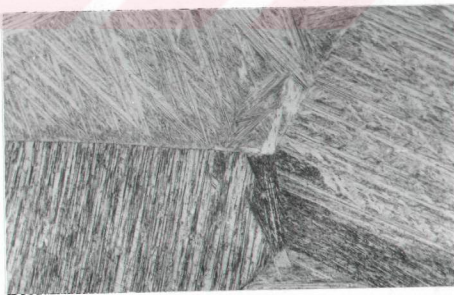
-b-

50 μ m

Şekil 6.1. Isıl işleme tabi tutulmayan, a) Alaşım 1, b) Alaşım 2'nin yüzey fotoğrafları.



-a-

100 μ m

-b-

100 μ m

Şekil 6.2. 930 °C de β -faz bölgesinde 30 dakika süre ile homojenleştirilen ve tuzlu-buzlu suda ani soğutulan numunelerden alınan yüzey mikrografları, a) Alaşım 1, b) Alaşım 2.

6.2. Numunelerin Özdirençlerinin Hesaplanması

Farklı kimyasal kompozisyonlara sahip olan Alaşım 1 ve Alaşım 2'nin 27 °C'deki elektriksel özdirençleri denklem 5.1 ile elektriksel özdirençleri bulunan numunelerin elektriksel iletkenlik katsayıları ise denklem 5.2 kullanılarak hesaplandı ve bulunan sonuçlar tablo 6.1'de verildi.

Bu sonuçlara bakılırsa her numuneye ait elektriksel özdirenç ve elektriksel iletkenlik katsayıları ısıtma işlemi ve yaşlandırma ile küçük bir değişim sergilemiştir.

6.3. Isıl İşlemsiz Numunenin Elektriksel İletkenlik Ölçüm Sonuçları

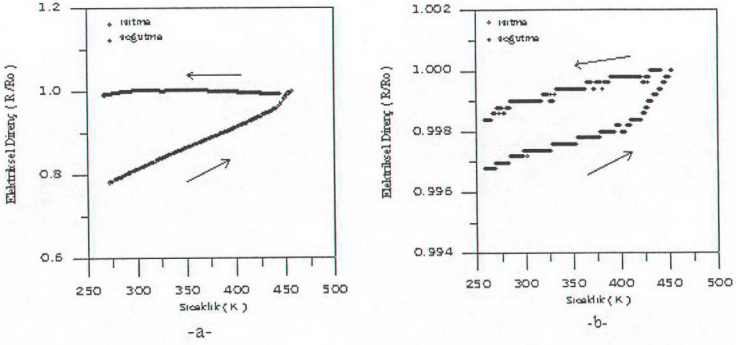
Şekil hatırlama özelliği gösteren numunenin ısıtma işlemi tabi tutulmadan iki prob metodu ile elektriksel iletkenliğin sıcaklığa bağlı değişimi ölçülerek R/R_0 -Sıcaklık grafiği çizildi (şekil 6.3.). Burada ısıtma işlemi uygulanmamış numunelerin dirençleri ısıtma esnasında artmaktadır. Geri dönüşümde yani soğutma sırasında elektriksel dirençleri Alaşım 1'de pek fazla değişmemekte, fakat Alaşım 2'de azalma görülmektedir. Isıl işlemsiz Alaşım 1 ve Alaşım 2'nin R/R_0 -Sıcaklık değişim karakteristikleri hemen hemen aynıdır. Elde edilen dönüşüm karakteristikleri tamamlanmamış sıcaklık eğrisidir.

6.4. Isıl İşlemli Numunelerin Elektriksel İletkenlik Ölçüm Sonuçları

Şekil hatırlamalı Cu-Al-Ni alaşımlarının ısıtma işlemi tabi tutulduktan sonra elektriksel iletkenliğin sıcaklığa bağlı değişimi incelendi. İki prob metodu ile yapılan ölçüm sonuçlarının R/R_0 -Sıcaklık grafiği şekil 6.4.'de verilmiştir.

Tablo 6.1. Numunelerin 27 °C'deki elektriksel özdirençleri ve elektriksel iletkenlik katsayıları.

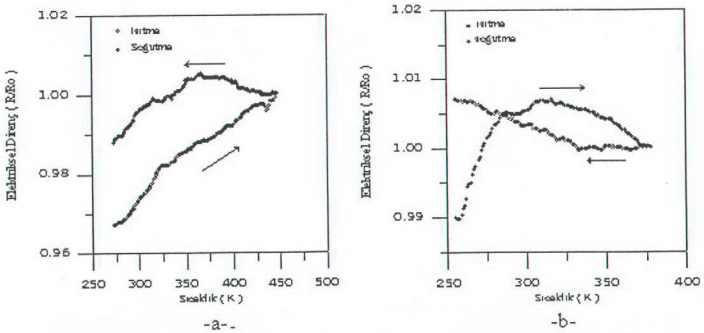
	Alaşım 1 ρ (ohm.cm)	Alaşım 2 ρ (ohm.cm)	Alaşım 1 σ (ohm.cm) ⁻¹	Alaşım 2 σ (ohm.cm) ⁻¹
Isıl İşlemsiz	12.5860x10 ²	3.8148x10 ²	0.07945x10 ⁻²	0.26214x10 ⁻²
Isıl İşlemli	12.5862x10 ²	3.8072x10 ²	0.07945x10 ⁻²	0.26266x10 ⁻²
1 saat yaşlandırılan	12.5863x10 ²	3.8076x10 ²	0.07945x10 ⁻²	0.26263x10 ⁻²
3 saat yaşlandırılan	12.5838x10 ²	3.8070x10 ²	0.07946x10 ⁻²	0.26267x10 ⁻²
5 saat yaşlandırılan	12.5859x10 ²	3.8070x10 ²	0.07945x10 ⁻²	0.26267x10 ⁻²
7 saat yaşlandırılan	12.5863x10 ²	3.8084x10 ²	0.07845x10 ⁻²	0.26258x10 ⁻²



Şekil 6.3. Isıl işlemsiz numunenin R/R_0 -Sıcaklık grafikleri (a) Aşım 1, (b) Aşım 2.

Şekil 6.4.a'da görüldüğü gibi Aşım 1 ısıtma esnasında sıcaklık artışı ile elektriksel direnci artmakta, soğutma esnasında ise elektriksel direnç bir miktar arttıktan sonra azalmaya başlamıştır. Aşım 1'in sergilediği dönüşüm geniş bir histeresise sahip olup tamamlanmamış sıcaklık eğrisi özelliğine sahiptir.

Aşım 2'de ise sıcaklık artarken elektriksel direnç önce artmış yapı değiştikten sonra azalmaya başlamıştır. Numune soğutulurken ise elektriksel direnç azaldıktan sonra artmaya başlamıştır ve dönüşüm bir noktada çakışmıştır (şekil 6.4.b). Aşım 2'nin ısıl işleminden sonraki dönüşüm histeresisi 100°C civarındadır.

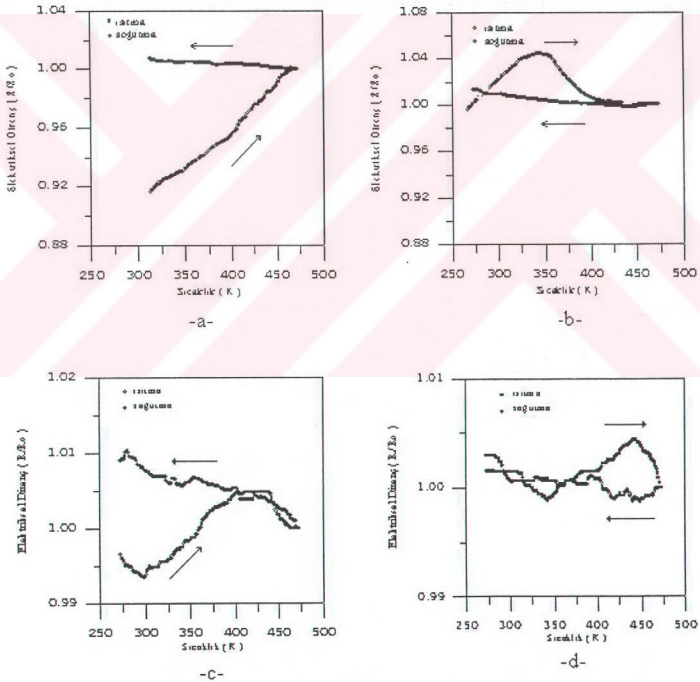


Şekil 6.4. 930°C de β -faz bölgesinde 30 dakika süre ile homojenleştirilen ve tuzlu-buzlu suda ani soğutulan numunenin R/R_0 -Sıcaklık grafikleri. a) Aşım 1 b) Aşım 2.

6.5. Elektriksel İletkenliğin Yaşlandırmaya Bağlı Ölçüm Sonuçları

200 °C'de 1 saat, 3 saat, 5 saat ve 7 saat termal yaşlandırılan Alaşım 1 ve Alaşım 2 numunelerinin iki prob metodu ile yapılan ölçümlerinden elde edilen değerler yardımı ile R/R_0 -Sıcaklık grafikleri çizildi. Alaşım 1'in R/R_0 -Sıcaklık grafikleri şekil 6.5'de Alaşım 2'nin R/R_0 -Sıcaklık grafikleri şekil 6.6'da verildi.

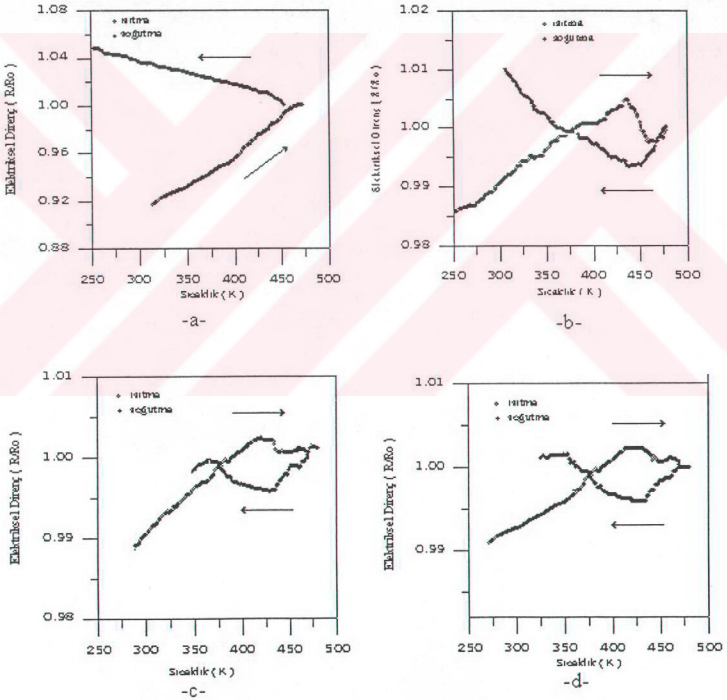
Şekil 6.5.a'daki çevrim Alaşım 1'in 1 saat termal yaşlandırıldıktan sonra R/R_0 -Sıcaklık karakteristiğidir. Bu çevrimde histeresis büyük olduğundan tamamlanmamış sıcaklık eğrisi ortaya çıkmıştır. Şekil 6.5.b'de ise 3 saat termal yaşlandırılan Alaşım 1'in dönüşüm karakteristiğine bakılırsa sıcaklık artarken elektriksel direnç önce artmış daha sonra azalmıştır. Soğutma esnasında elektriksel direnç fazla değişmemiştir.



Şekil 6.5. Alaşım 1'in yaşlandırmaya bağlı R/R_0 -Sıcaklık grafikleri. a) 1 saat b) 3 saat c) 5 saat d) 7 saat yaşlandırılan numuneler.

Şekil 6.6.a'da verilen 1 saat termal yaşlandırılan Alaşım 2'nin R/R_0 -Sıcaklık eğrisi tamamlanmamış sıcaklık eğrisidir. Şekil 6.6.b, c ve d ise faz dönüşüm histeresis termal yaşlandırma zamanı artışı ile azda olsa arttığı görülmektedir. Isıtma esnasında şekil 6.6.b'de görülen elektriksel direncin ani düşüş şekil 6.6.c ve d eğrilerinde azalmıştır. Bu çevrimlerde histeresis 100°C civarındadır.

Alaşım 1 ve Alaşım 2'nin bölüm 5'de belirtilen ısıtma işleminden sonra yapılan 1 saat fırın içerisindeki termal yaşlandırmadan sonra yapılan ölçüm sonucunda çizilen R/R_0 -Sıcaklık grafikleri geri dönüşümde çakışmamaktadır. Fakat 3, 5 ve 7 saat yaşlandırmalar sonundaki gösterdikleri R/R_0 -Sıcaklık karakteristikleri geri dönüşümde ısıtma eğrisi ile çakışmıştır. Fakat bu dönüşümlerde yapı bir kararsızlık sergilemiştir.



Şekil 6.6. Alaşım 2'nin yaşlandırmaya bağlı R/R_0 -Sıcaklık grafikleri. a) 1 saat b) 3 saat c) 5 saat d) 7 saat yaşlandırılan numuneler.

SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Şekil hatırlamalı alaşımlar sıcaklık etkilerine karşı hassastır ve yaşlandırma ile şekillerini geri kazanma özelliği etkilenir. Bununla birlikte ısıtma işlemleri ile yapılarındaki dönüşümlerden dolayı bu tür malzemelerin elektriksel dirençlerinde de değişimler meydana gelir.

Bu çalışmada incelenen farklı yüzdeli CuAlNi alaşımlarından elde edilen Alaşım 1 ve Alaşım 2 numuneleri ısıtma işlemi uygulanmadan önce alınan x-ışınları difraksiyonu piklerinden görüldüğü gibi pikler (ayrı ayrı çıkmayıp bir tepe görünümünde olduğundan) düzenli bir yapıya sahip değillerdir.

Alaşım 1 ve Alaşım 2 numunelerinin β -faz bölgesinde 930 °C'de 30 dakika ısıtma işlemi tabii tutulup ani soğutulduktan sonra alınan x-ışınları difraksiyonu piklerine bakıldığında numunelerin düzenli bir yapıya dönüşmüşlerdir (Aydoğdu, 1995).

Bu alaşımların ısıtma işlemi uygulamadan önce alınan mikrograflarında Alaşım 1'de martensit plakaları ve taneler mevcut olup, Alaşım 2'de ise az miktarda martensit plakası mevcuttur. Isıtma işlemi uygulandıktan sonra ani soğutulan numunelerden alınan mikrograflarda Alaşım 1'de taneler ve martensit plakalar daha belirgin bir durum almıştır. Alaşım 2'de ise taneler Alaşım 1'e göre daha büyük olarak oluşmuş ve tane sınırlarında birbirini kesen farklı yönelimlerde martensit plakaları mevcuttur.

Numunelerin R/R_0 -Sıcaklık grafikleri incelendiğinde ısıtma işlemleri numunelerde sıcaklığa bağlı direnç değişimi bir düzenlilik göstermektedir. 250K-473K sıcaklıkları arasında yapılan ölçümlerde Alaşım 1 ve Alaşım 2 numunelerinin dirençleri artan sıcaklık ile artmış ve soğutma ile de dirençlerinde bir düşüş göstermiştir (şekil 6.3). Isıtma-soğutma ile direnç eğrilerinde bir histeresis gözlenmiş ve soğutma işleminden sonra direnç değeri ısıtmadan önceki başlangıç değerlerinden büyük olmuştur. Yani ilk değere geri dönememiştir.

Isıtma işlemi uygulandıktan sonra ani soğutulan numunelerin R/R_0 -Sıcaklık grafiklerine bakıldığında (şekil 6.4) Alaşım 1 numunesinde artan sıcaklık ile direnç değerleri düşüş eğilimi göstermiştir. Ancak dirençlerdeki artış ve düşüşler ısıtma işlemleri numunelerdeki gibi bir düzenlilik mevcut değildir. Bu da ani soğutmadan hemen sonra yapılan kararlı bir hale dönmediğini ve kararsız bir yapıya sahip olduğunu gösterir. Alaşım 2'de ise (şekil 6.4.b) bu kararsızlık daha da belirgindir ve soğutmadan sonra direnç değerleri ısıtma halindeki değerlerinden daha küçük bulunmuştur.

200 °C'de 1, 3, 5 ve 7 saat termal yaşlandırma işlemine tabii tutulmuş Alaşım 1 numunesinin R/R_0 -Sıcaklık grafikleri (şekil 6.5) incelendiğinde yaşlandırma zamanına bağlı olarak düzenli bir değişim gözlenmemiş ve ilgi kurulamamıştır. Ancak grafikler incelendiğinde 3 ve 7 saat yaşlandırılan numunelerde soğutma halindeki direnç değerleri

ısıtma esnasında ölçülen direnç değerlerinden daha küçük çıkmıştır. 1 ve 5 saat yaşlandırılan numunelerde ise bu durum tam tersidir. Ayrıca yaşlandırma süresi arttıkça numunelerdeki kararsızlığın daha da arttığı gözlemlendi. Ayrıca ısı işlemlere tabi tutulan Alaşım 2 numunesinin R/R_0 -Sıcaklık grafiklerine (şekil 6.6) bakıldıklarında 1 saat yaşlandırılan numunelerde sıcaklık artışı ile direncinde artış gözlenmiş ve bu artış soğutma ile de devam etmektedir. 3, 5, ve 7 saat yaşlandırılan numunelerde ise sıcaklık artışı ile direnç değerleri artmış ve soğutma ile bu değerler azalmıştır.

Bu çalışmada bulunan sonuçlara göre ısı işlem ile numunedeki kararsızlığın arttığı bu kararsızlığın numunelerin dirençleri üzerinde etkili olduğu ve ısıtma-soğutma ile direnç eğrilerinde bir histeresisin oluştuğu gözlemlendi.

KAYNAKLAR

- ADIGÜZEL, O. ve CEYLAN, M., (1988). Shape Memory Phenomena in Noble Metal Copper Based Alloys. **J. Inst. Sci.** Gazi Üniv., 1, 1, 35-41.
- ARTUNÇ, E., (1988). Demir- Alüminyum-Karbon Alaşımlarındaki Martensitik Faz Dönüşümünün Kristalografik Analizi. **Doktora Tezi.** Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- AYDOĞDU, A., (1990). Soy Metal Alaşımlarda Termoelastik Martensitik Dönüşümlerin Kristalografisi. **Yüksek Lisans Tezi.** Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- AYDOĞDU, A., (1995). Şekil Hatırlamalı CuAlNi Alaşımlarındaki Martensitik Dönüşümler Üzerindeki Termal Yaşlandırma Etkileri. **Doktora Tezi.** Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- BARRETT, C.S. ve MASSALSKI, T.B., (1980). **Structure of Metals**, Pergamon Press, Oxford.
- CHRISTIAN, J.K., (1975). **The Theory of Transformation in Metals and Alloys.** Part 1, Pergamon Press, Hungary.
- ÇAKMAK, S., (1992). Bakır Bazlı Alaşımlarda Martensit Varyantlarının Grup Kombinasyonları. **Doktora Tezi**, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- DELAHEY, L., DERUYTTERE, A., AERNOUDT, E. ve ROSS, J.R., (1978). Shape Memory Effect, Superelasticity and Damping in Copper-Zinc-Aluminium. **INCRA Report R1**, Belgium.
- DELAHEY, L., KRISHAN, R.V., TAS, H. ve WARLIMONT, H., (1974). Termoelasticity, Pseudoelastictiy and the Memory Effect Associated with Martensitic Transformations. Part 1, **Journal of Materials Science**, 9, 21-1535.

- DURLU, T.N.,** (1979). Strain-Induced Martensite in Fe-Ni-C Alloys. **Proceedings of ICOMAT 79**, Baston, 40-45.
- FRIEND, C.M.,** (1986). The Effect of Applied Strain in CuZnAl Shape Memory Alloys. **Scripta Metall.**, 20, 995-1000.
- FUNAKUBO, H.,** (1978). **Shape Memory Alloys**, (Japonca'dan İngilizce'ye Çeviri), J.B. Kennedy, Gordon and Breach Science Publishers, London.
- GHOSH, B., BANERJEE, M.K. ve SEAL, A.K.,** (1986). Shape Memory in Some Copper Alloys. **Metarials Science and Technology**, 2, 496-499.
- GOLESTANEH, A.A.,** (1984). Shape-Memory Phenomena, **Physics Today**, 62-70.
- HIGHT, R. ve PLOUGH, C.,** (1983). Temperature-Dependent Resistivity of Highly Disordered Ni-Cr-Al alloys, **Physical Review B**, 29,10,5920-5921.
- HONNA, T.,** (1986). The Mechanism of the All-Round Shape Memory Effect. **Shape Memory Alloys ' 86, Proceedings of the International Symposium on Shape Memory Alloys**, China Academic Publishers, 83-88.
- KITTEL, C.,** (1976). **Introduction to Solid State Physics**, 6 th edition, John Wiley & Sons, Inc. New York.
- KUBO, H. ve HIRANO, K.,** (1973). Crystallography of Martensitic Transformation with Long Period Stacking Order. **Acta Metall.**, 21, 1669-1675.
- LEE, S.E., ve KIM, Y.G.,** (1989). Composotion Dependence of Aging Kinetics in Some CuZnAl Shape Memory Alloys. **Metallurgical Transaction**. 21, 1669-1687.
- LIAN-CHENG ZHAO ve ZHANG. C.S.,** Stability of Deformed Martensite NiTiNb Shape Memory Alloys. Harbin Institute of Technoloy Department of Metals and Technology Harbin, 947-952.
- MORII, Y. ve IIZUME, M.,** (1985). Lattice Instability in CuAlNi Related to Martensitic Phase Transition, **Journal of Physical Society of Japan**, 54, 2948-2954.

- NEMONSHAKALENKO, V.V. ve ZHALCO, A.V., (1995). Electronic Structure and Martensitic Transformation in ZrRh Alloys. *Jurnal de Physique*, **5**, 1151-1156.
- NOYAN, E., (1990). Shape Memory Desing. **A Ph.d Thesis**, Metalurgical Engineering Middle East Tecnical University, Ankara.
- OSHİMA, R., TAKAHASHI, M., TANIYAMA, A. ve TSNODA. Y., (1992). First Order Phase Transition of Fe-Rh Alloys, Predings of the International Conference on Martensitic Transformation.1212-1216.
- OLSON, G.B. ve COHEN, M., (1975). Termoelastic Behavior in Martensitic Transformations. *Scripta Metall.*, **9**, 1247-1254.
- ORTIN, J. ve PLANES, A., (1989). Thermodynamics of Termoelastic Martensitic Transformations. *Acta Metall.*, **37**, 5; 1433-1441.
- OTSUKA, K. ve SHIMIZU, K., (1986). Pseudoelasticity and Shape Memory Effects in Alloys. *International Metals Reviews*, **31**, 3, 93-114.
- PERKINS, J. ve SPONHOLZ, R.O., (1984). Stress-Induced Martensitic Transformation. Cycling and Two-Way Shape Memory Training in Cu-Zn-Al Alloys. *Metall Trans. A*, **15A**, 313-321.
- PLANES, A. ve VINALS, J., (1983). Effect of Atomic Order on a Martensitic Transformations. . *Philosophical Magazine A*, **48**, 4,501-508.
- SABURI, T., NENNO, S. ve WAYMAN, C.M., (1979). Shape Memory Mechanism in Alloys. *Proceedings of Icomat 79*, Canbridge, Massachusetts, USA, 24-29 June, 619-632.
- SCHETKY, L. M., (1980). Shape Memory Alloys. *Scientific American*, 68-76.
- SCHRODER, D. K. (1990). (Eds.) **Renewable Energy**, 2 World Renewable Energy Congress, Pergamon Press. Oxford, New York.
- SERİN, N., (1990). **Entegre Devreler**, Ankara Üniversitesi Fen-Fak. Birinci Baskı, Ankara.

TADAKI, T., TAKAMORI, T. ve SHIMIZU, K., (1986). Thermal Cycling Induced Disordering in Parent Phase of a Cu-Zn-Al Shape Memory Alloy. **Shape Memory Alloy 86, Proceedings of the International Symposium on Shape Memory Alloys**, China Academic Publishers, 303-308.

WARLIMONT, H. ve DELAEY, L., (1974). Martensitic Transformations in Copper-Silver and Gold-Based Alloys. **Pergamon Press**, Oxford, New York.

WECHSLER, M.S., (1985). Martensitic Transformations in Solids. Iowa State University, Ames, Iowa, USA.

**T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ**