

**KIRIKKALE ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**FİZİK ANABİLİM DALI**  
**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Cu-%25Mn-%11Al ALAŞIMININ MEKANİKSEL VE ELEKTRİKSEL**  
**ÖZELLİKLERİ ÜZERİNE ISIL İŞLEM ETKİLERİNİN İNCELENMESİ**

**Yasin Göktürk YILDIZ**

**ŞUBAT 2006**

## ÖZET

### Cu-%25Mn-%11Al ALAŞIMININ MEKANİKSEL VE ELEKTRİKSEL ÖZELLİKLERİ ÜZERİNE ISIL İŞLEM ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

YILDIZ, Yasin Göktürk

Kırıkkale Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Fizik Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Prof. Dr. Tahsin Nuri DURLU

Şubat 2006, 46 sayfa

Bu çalışmada, Cu-%25Mn-%11Al alaşımında oluşan austenite fazı içerisindeki çökelti fazları Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ile, bu çökelti fazlarının kütle oranları Enerji Dağılımlı X-Işınları Spektroskopisi (EDS) sistemi ile belirlenmiştir. Ayrıca alaşımın mekanik dayanımının belirlenmesi için zor-zorlanma, elektriksel özelliklerinin incelenmesi için elektriksel ölçüm teknikleri kullanılmıştır. Elektron mikroskop incelemeleri sonunda Cu-%25Mn-%11Al alaşımında austenite tane yapısı ve çökeltme sertleşmesi görülmüştür. Gözlenen bu fazların alaşıma uygulanan ısıtılma ve soğutma hızına bağlı olduğu görülmüştür.

Çökeltme fazı gözlenen numune ile austenite fazı gözlenen numune karşılaştırıldığında mekaniksel ve fiziksel olarak farklılıklar görüldü.

Bu farklılıklara bakıldığında; içinde çökelme fazı gözlenen numunenin akma dayanımının, saf austenite faz yapısına sahip numunenin akma dayanımından %23.5 kadar daha yüksek olduğu görülmüştür. Bu ise çökelme sertleşmesinin austenite tane yapısına göre, alaşıma %23.5 oranında bir sertlik kazandırdığını göstermiştir. Bunun yanında elektriksel direnç bakıldığında; çökelme fazı, austenite faza göre alaşıma %30 kadar elektriksel direnç kazandırmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Çökelme sertleşmesi, zor-zorlanma, akma dayanımı, elektriksel direnç, taramalı elektron mikroskobu

## **ABSTRACT**

### **INVESTIGATION OF MECHANICAL AND ELECTRICAL PROPERTIES OF Cu-%25Mn-%11Al ALLOY ON HEAT TREATMENT**

YILDIZ, Yasin Göktürk

Kırıkkale University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Physics, M. Sc. Thesis

Supervisor: Prof. Dr. Tahsin Nuri DURLU

February 2006, 46 Pages

In this work, precipitation phases in an austenite phase in Cu-%25Mn-%11Al alloy were investigated by means of Scanning Electron Microscope (SEM) and mass ratios of these precipitate phases were determined by Energy Dispersion X- Ray Spectroscopy (EDS). In addition, in order to determine the mechanical strength of the alloy and its electrical properties, stress-strain and electrical measurement techniques were performed respectively. The results of SEM measurements revealed that there are the austenite grain structure and the precipitation hardening in Cu-%25Mn-%11Al alloy. It was also observed that the properties of these phases depend on the heat treatment and the cooling rate.

A comparison of the sample with the precipitation phase and austenite phase showed that there are differences in their mechanical and physical properties.

During consideration of obtained different results, it was observed that the yield strength of the sample which contains precipitation was %23.5 higher than the yield strength of the sample that was in pure austenite phase. Therefore, precipitation hardening has %23.5 higher contribution to the overall alloy hardening. Furthermore precipitation phase contribute the overall electrical resistivity %30 higher than the austenite phase.

**Keywords:** Precipitation hardening, stress-strain, yield strength, electrical resistivity, scanning electron microscopy.

## TEŞEKKÜR

Tezimin hazırlanması esnasında her türlü yardımını esirgemeyen, sonsuz bilgi ve tecrübe birikimini biz genç araştırmacılara sunan, bilimsel deney imkanlarını sonuna kadar bizlerin hizmetine veren, tez yöneticisi hocam, **Sayın Prof. Dr. Tahsin Nuri DURLU**'ya teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmalarım esnasında yardımlarını esirgemeyen **Sayın Prof. Dr. Mustafa DİKİCİ** ve **Sayın Prof. Dr. İlhan AKSOY**'a teşekkür ederim. Bilimsel konularda daima yardımını gördüğüm **Sayın Yrd. Doç. Dr. Uğur SARI**'ya, laboratuvar çalışmalarımda bana yardımcı olan **Sayın Yrd. Doç. Dr. Talip KIRINDI** ve **Araş. Gör. Dr. Emre GÜLER**'e teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Destekleri ile her zaman yanımda olan aileme ve arkadaşlarıma teşekkür ederim.

## ŞEKİLLER DİZİNİ

|                                                                                                                                             |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 1.1. Çökelme sertleşmesi faz diyagramı.....                                                                                           | 4  |
| Şekil 1.2. Çözündürme ve yaşlanma aşamalarını içeren, çökelme<br>sertleşmesi işlemini gösteren diyagram.....                                | 7  |
| Şekil 1.3. Aşırı doymuş katı çökeltinin sertliğinin değişik yaşlanma<br>sürelerine göre değişimini gösteren eğriler.....                    | 8  |
| Şekil 1.4. Yaşlanma sırasında aşırı doymuş durumdaki alaşımların fiziksel<br>özelliklerinde meydana gelen değişimleri gösteren eğriler..... | 9  |
| Şekil 1.5. Cu-Zn denge diyagramı.....                                                                                                       | 13 |
| Şekil 1.6. Al-Cu denge diyagramı.....                                                                                                       | 15 |
| Şekil 1.7. Cu-Sn denge diyagramı.....                                                                                                       | 17 |
| Şekil 1.8. Cu-Ni denge diyagramı.....                                                                                                       | 19 |
| Şekil 1.9. Katı eriyik mukavemetlenmesinin ve soğuk şekillendirmenin<br>bakırın elektrik iletkenliği üzerine etkisi.....                    | 20 |
| Şekil 1.10. Bir alüminyum alaşımı için zor-zorlanma eğrisi.....                                                                             | 22 |
| Şekil 2.1. Elektriksel direnç ölçüm düzeneği.....                                                                                           | 27 |
| Şekil 3.1.a. Oda sıcaklığında suda soğutma işlemine tabi tutulan N1<br>numunesinin austenite tane yapısı.....                               | 29 |
| Şekil 3.1.b. Fırında yavaş soğutma işlemine tabi tutulan N2 numunesine ait<br>SEM fotoğrafı.....                                            | 29 |
| Şekil 3.2.a. Suda soğutulan N1 numunesinin zor-zorlanma eğrisi.....                                                                         | 32 |
| Şekil 3.2.b. Fırında soğutulan N2 numunesinin zor-zorlanma eğrisi.....                                                                      | 33 |

|                                                                                                                |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 3.3. Orijinal Cu-%25Mn-%11Al alaşıımının, elektriksel direncinin sıcaklığın tersine bağılı değışimi..... | 35 |
| Şekil 3.4. Orijinal Cu-%25Mn-%11Al alaşıımının, elektriksel direncinin sıcaklığa bağılı değışimi.....          | 36 |
| Şekil 3.5. N1 numunesine ait I-V karakteristiğı.....                                                           | 38 |
| Şekil 3.6. N2 numunesine ait I-V karakteristiğı.....                                                           | 39 |

## ÇİZELGELER DİZİNİ

|                                                                                                                    |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Çizelge 3.1. Cu-%25Mn-%11Al numunelerine aynı ısıtım işlem ve farklı soğutma uygulanarak hazırlanan numuneler..... | 28 |
| Çizelge 3.2. N2 numunesinin ısıtım işlem davranışlarında işaretlenmiş fazların EDS analizleri.....                 | 30 |
| Çizelge 3.3. Oda sıcaklığında N1 ve N2 numunelerine ait V-I ölçüm değerleri.....                                   | 37 |

## İÇİNDEKİLER

|                                                         |      |
|---------------------------------------------------------|------|
| ÖZET.....                                               | i    |
| ABSTRACT.....                                           | iii  |
| TEŞEKKÜR.....                                           | v    |
| ŞEKİLLER DİZİNİ.....                                    | vi   |
| ÇİZELGELER DİZİNİ.....                                  | viii |
| İÇİNDEKİLER.....                                        | ix   |
| 1. GİRİŞ.....                                           | 1    |
| 1.1. Metal ve Metal Alaşımları.....                     | 1    |
| 1.2. Faz Dönüşümleri.....                               | 2    |
| 1.3. Çökelme Sertleşmesi.....                           | 3    |
| 1.3.1. Çökelme Sertleşmesi Isıl İşlemi.....             | 4    |
| 1.3.1.1. Çözündürme Isıl İşlemi.....                    | 5    |
| 1.3.1.2. Hızlı Soğutma.....                             | 6    |
| 1.3.1.3. Yaşlandırma İşlemi.....                        | 6    |
| 1.3.2. Yaşlandırma Koşulları.....                       | 10   |
| 1.4. Bakır ve Bakır Alaşımları.....                     | 10   |
| 1.4.1. Bakır-Çinko Alaşımları (Pirinçler).....          | 11   |
| 1.4.2. Bakır-Alüminyum Alaşımları.....                  | 13   |
| 1.4.3. Bakır-Kalay Alaşımları.....                      | 15   |
| 1.4.4. Bakır-Nikel Alaşımları.....                      | 17   |
| 1.4.5. Bakır-Nikel-Çinko Alaşımları (Nikel Gümüşü)..... | 18   |
| 1.5. Elektriksel İletkenlik.....                        | 19   |

|                                                                                      |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1.5.1. Metallerin İletkenliklerinin Kontrolü.....                                    | 20 |
| 1.6. Deformasyon.....                                                                | 21 |
| 2. MATERYAL ve YÖNTEM.....                                                           | 23 |
| 2.1. Materyal.....                                                                   | 23 |
| 2.1.1. Numunelerin Hazırlanması.....                                                 | 23 |
| 2.1.2. Zor-Zorlanma Deneyleri İçin Numunelerin Hazırlanması.....                     | 24 |
| 2.1.3. Taramalı Elektron Mikroskobu Gözlemleri İçin Numunelerin<br>Hazırlanması..... | 24 |
| 2.1.4. Elektriksel Direnç Ölçümleri İçin Numunelerin Hazırlanması....                | 25 |
| 2.2. Yöntem.....                                                                     | 25 |
| 2.2.1. SEM ve EDS.....                                                               | 25 |
| 2.2.2. Elektriksel Direnç Ölçümü Deney Düzeneği ve Yöntemi.....                      | 26 |
| 3. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA.....                                              | 28 |
| 3.1. Cu-%25Mn-%11Al Alaşımının Mikro Yapısı Üzerinde Isıl İşlemlerin<br>Etkisi.....  | 28 |
| 3.2. Cu-%25Mn-%11Al Alaşımının Mekaniksel Davranışları.....                          | 31 |
| 3.3. Cu-%25Mn-%11Al Alaşımının Elektriksel Özellikleri.....                          | 35 |
| 4. SONUÇ.....                                                                        | 41 |
| KAYNAKLAR.....                                                                       | 44 |

# 1. GİRİŞ

## 1.1. Metal ve Metal Alaşımları

Teknolojik gelişmelerin getirdiği gereksinimlerden dolayı; metal ve metal alaşımlarının mekanik ve fiziksel özelliklerinin anlaşılması pek çok bilimsel çalışmaya konu olmuştur. Özellikle sıcaklık, zor-zorlanma ve bunların farklı bileşimleri gibi etkilere maruz kalan bazı metal ve metal alaşımlarında görülen olağanüstü mikro yapısal değişiklikler ve bunun sonucunda oluşan makroskobik şekil değişimlerinin atomik boyutta ki nedenleri açıklanmaya çalışılmıştır<sup>(1,2)</sup>.

Uygulanan bir elektrik alanının etkisi altında; elektriği iyi ileten katıya *metal* veya *iletken*<sup>(3)</sup>, en az biri metal olmak üzere iki veya daha fazla elementten oluşan ve metal özelliği gösteren maddeye ise *alaşım* denir<sup>(4)</sup>. Metaller katı durumda kristal yapıdadırlar, yani maddeyi oluşturan atomlar üç boyutlu bir düzlem içinde bulunurlar. Üç boyutlu bir düzene göre dizilen ve denge konumunda bulunan atomların merkezlerinin birleştirilmesi ile ortaya çıkan görünüme kristal örgü denir<sup>(5)</sup>.

Endüstride saf metaller yerine bunların alaşımları kullanılır. Bir metalin yapısına (bileşimine) başka maddeler katılarak onun özellikleri, amaçlara uygun bir şekilde değiştirilebilir. Bu nedenle malzeme bilgisi içerisinde alaşımların önemli bir yeri vardır.

Genelde aşağıda sıralanan ihtiyaçlara cevap vermesi amacıyla alaşım yapılır<sup>(6)</sup>.

- Malzemenin fiziksel ve mekaniksel özelliklerini değiştirmek suretiyle daha elverişli malzemeler üretmek.
- Çok sayıda ve değişik özelliklerde malzemeler geliştirerek ihtiyaçlara cevap vermek.
- Isıl işlemlere uygun malzemeler üretmek.
- Malzemenin maliyetini düşürmek.
- Malzemeyi aşınma ve dış şartların yıpratıcı etkilerinden korumak.

Alaşım sistemi, farklı element atomlarının mümkün olan bütün oranlarda karıştırılması sonucu meydana gelen bütün alaşımları içerir. Alaşımlar genellikle yapılarına ve faz diyagramlarına bağlı olarak sınıflandırılabilir.

## **1.2. Faz Dönüşümleri**

Sürekli bir maddede; kristal özellikleri ve atomların düzenlenişi kendi içinde homojen olan ve fiziksel olarak maddenin diğer kısımlarından ayrılan her bölge bir *faz* olarak tanımlanır. Burada homojen olma, belirli fiziksel şartlar altında özel bir yapıda bulunma şeklinde tanımlanır. Metal ve metal alaşımları, farklı fiziksel şartlar altında farklı fazlarda bulunur. Yapı içerisinde belirli fazlardan oluşan bir denge yapısından değişik fazlardan oluşan bir

başka denge yapısına geçiş olayı ise *faz dönüşümü* olarak bilinir. Katı yapıdaki faz dönüşümleri sırasında atomlar yeni faz yapısını oluştururken yer değiştirirler. Bu yer değiştirmelerde atomların konumlarını ve komşuluklarını korudukları dönüşümler katıhal fiziğinde önemlidir<sup>(7,8)</sup>. Faz dönüşümü, olay sırasında atomların komşuluklarının değişip değişmemesine göre iki ana gruba ayrılır.

Atomların komşuluklarını değiştirecek şekilde meydana gelen faz dönüşümlerine *yayılmalı (difüzyonlu) faz dönüşümleri*, atomların komşuluklarını değiştirmeden meydana gelen faz dönüşümlerine de *yayılmaz (difüzyonsuz) faz dönüşümleri* denir. Metalik sistemlerdeki faz dönüşümleri *çekirdeklenme ve büyüme dönüşümleri* ve *martensitik dönüşümler* olmak üzere iki ana sınıfa ayrılır<sup>(9)</sup>.

Genelde faz dönüşümü, iki faz arasındaki serbest enerji farkından meydana gelir. Serbest enerji sıcaklık ve basınçtan etkilenir. Bir faz dönüşümü sıcaklık ve basıncın yanında dış zor ve yapı kusurları gibi diğer faktörlerden de etkilenir. Dolayısıyla dönüşümün hangi şartlar altında gerçekleştiğini bilmek önemlidir. Bu değişkenler yardımı ile faz dönüşümlerini kontrol ederek, istenen özelliklere sahip, ihtiyaca uygun türde malzeme elde etmek mümkün olmaktadır<sup>(10)</sup>.

### **1.3. Çökelme Sertleşmesi**

Bir metalin kristal yapısının plastik şekil değişimine karşı direncini artırabilmek için üç önemli genel yöntem vardır<sup>(4)</sup>. Bunlar soğuk şekil verme, katı çözelti sertleşmesi ve çökelme sertleşmesidir.

Alaşıım elementleri, esas metale özelliklerini değiştirmek ve arzu edilen karakteristikleri kazandırmak için eklenir. Alaşıım elementlerinin katı çözeltiliğine girmesiyle, elektriksel iletkenlik ve süneklikte azalma, sertlik ve mekanik dayanımda artma vardır ve bu katı çözeltili sertleşmesi veya alaşıım sertleşmesi adını alır<sup>(4)</sup>.

Çökeltme sertleşmesi, bazı alaşımlar için sertlik ve dayanımı artırmak için geliştirilmiş temel sertleştirme mekanizmasıdır ve çözünmenin temel karakteristiğine dayanır<sup>(6)</sup>. Bu metodun prensibi genelleştirilmiş olarak Şekil 1.1’de çökeltme sertleşmesi faz diyagramı ile ifade edilmiştir. Sıvı X alaşımı denge altına soğutulursa,  $T_1$  sıcaklığında katılaşma başlar ve  $T_2$  sıcaklığında son bulur<sup>(6)</sup>.



$T_3$  erişinceye kadar fazda herhangi bir değişiklik yoktur. Soğutmaya devam edildiğinde ikinci bir faz tane sınırları boyunca ve kayma düzlemlerinde çökeler. Bu çökelen faz, aslında esas metal, eriyik metal veya bir ara faz olabilir.

Başka bir deyişle, soğutma hızı, çok hızlı ise tamamlanmamış çökeme elde edilir. Gerçekte  $T_2$  ve  $T_3$  sıcaklıkları arasında, hızlı soğuma, çoğu alaşımda, çözeltideki bütün ikinci faz içeriğini muhafaza etmeye müsaade etmek için yeterlidir.

Çözeltideki B atomları fazla olduğundan çökemenin meydana gelmesine eğilim vardır. Uygulama süresinde çökemenin meydana gelip gelmemesi difüzyon hızına bağlıdır. Difüzyon yeterince hızlı ise, çökeme oda sıcaklığında meydana gelir. Bu durumda alaşım doğal yaşlanır. Çoğu alaşımda, oda sıcaklığında difüzyon çok yavaştır.  $T_3$  den daha düşük sıcaklıklara ısıtma, difüzyonu artırır ve çökelmeye müsaade eder. Bu durumda alaşım yapay olarak daha hızlı yaşlanır.

Çökeme sertleşmesi üç temel aşamayı izleyen işlem gerektirir;

- Çözündürme ısıl işlemi.
- Hızlı soğutma.
- Çökeltme (yaşlandırma) işlemi.

#### **1.3.1.1. Çözündürme Isıl İşlemi**

Söz konusu ısıl işlem, kısmi katı çözünürlük gösteren yani solvüs eğrisi içeren ve katı çözünürlüğü, sıcaklıkla artan veya azalan alaşım sistemlerine uygulanır. Bu sistem, sıvı durumda birbiri içerisinde her oranda,

katı durumda ise kısmen çözünen metallerin oluşturduğu sistemdir. Alaşım Şekil 1.1’de belirtilen  $T_3$  sıcaklığının üzerine ısıtılması ve homojen yapı elde etmek için bir süre tutmayı içerir.

$T_3$  müsaade edilen tam çözünme için en düşük sıcaklıktır ve  $T_0$  yarı kararlı olabilen ötektiğin erimesinden kaçınmak için kullanılan maksimum sıcaklıktır. Pratikte mümkün olan en yüksek sıcaklık en hızlı difüzyonu elde etmek için kullanılır<sup>(6)</sup>.

#### 1.3.1.2. Hızlı Soğutma

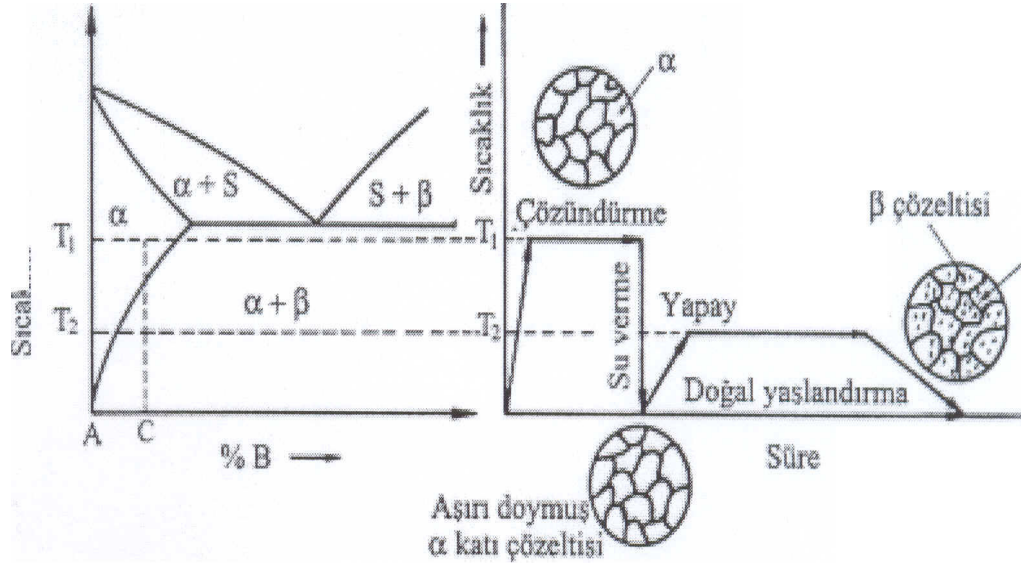
Numune, düşük sıcaklığa (genelde oda sıcaklığına) hızlı olarak soğutulur (suda soğutma yeterlidir). Soğutma ortamı oda sıcaklığında genelde sudur. Suda hızlı soğutmadan sonra alaşım örneğinin yapısı aşırı doymuş katı çözelti içerir.

#### 1.3.1.3. Yaşlandırma İşlemi

Yaşlanma işlemi oda sıcaklığında veya oda sıcaklığı ile solvüs çizgisi arasındaki bir sıcaklıkta gerçekleştirilir. Oda sıcaklığındaki yapılan yaşlanmaya *doğal yaşlanma*, oda sıcaklığının üzerindeki sıcaklıklarda yapılan yaşlanmaya ise *yapay yaşlanma* denir<sup>(6)</sup>.

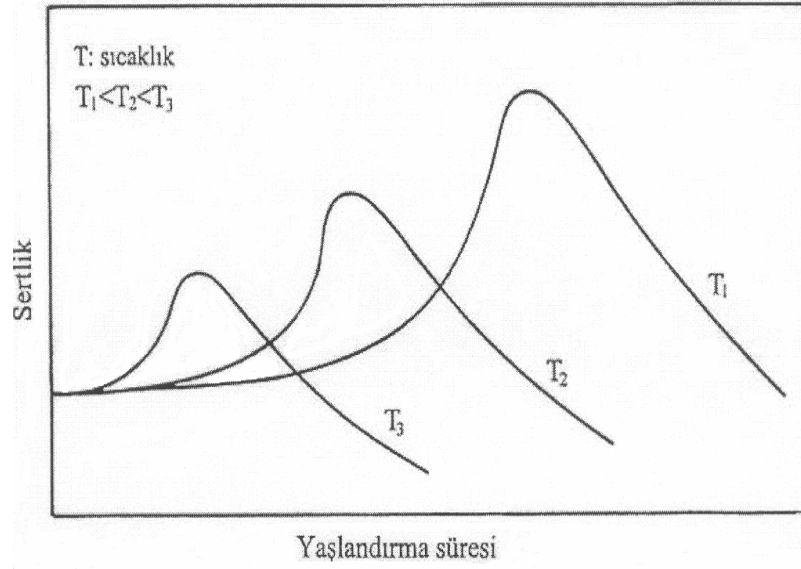
Yaşlanma işlemi; hazırlık devresi ve aşırı yaşlanma devresi olmak üzere 3 aşamayı içerir. Kuluçka devresi de denenen hazırlık devresinde, fazlalık atomlar bir araya gelip kümeleşerek, ilk embriyoyu meydana getirirler. Yaşlanma aşamasında ise çekirdekleşme mekanizması daha etkin hale gelir,

yani fazlalık atomlar  $\beta$  fazının çekirdeklerini oluştururlar. Yaşlanma devresinde oluşan ara kristal yapısı veya geçiş kafesi matrisin kafes yapısı ile bağdaşıktır. Bu dönemde çökelen faz ( $\beta$ ), matrisin farklı bir kafes parametresine sahiptir. Bu fazın matris yapısına bağdaşık olması nedeniyle, matrisin kafes yapısında distorsiyon meydana gelir. Kafes yapısında meydana gelen distorsiyonun, dislokasyon hareketini engellemesi nedeniyle, bu aşamada alaşımın sertlik ve mukavemeti bu dönemde hızlı bir şekilde artar. Yaşlanma sırasında meydana gelen çökeltme aşamaları Şekil 1.2'de görülmektedir.



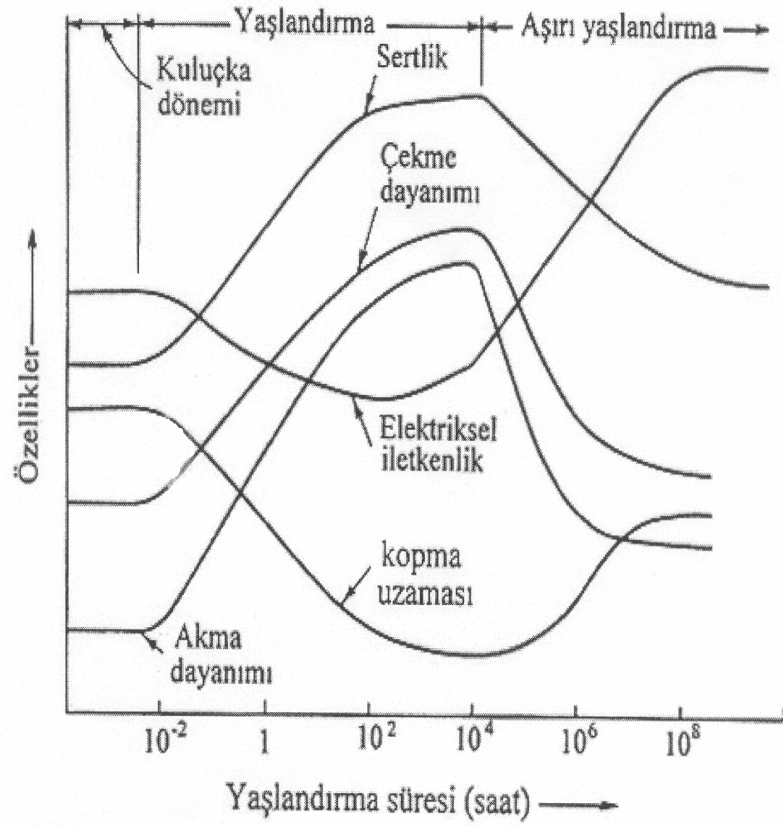
**Şekil 1.2.** Çözündürme ve yaşlanma aşamalarını içeren, çökeltme sertleşmesi işlemini gösteren diyagram<sup>(4)</sup>.

Çözündürme ve su verme işleminden sonra değişik sıcaklıklarda yaşlandırılan alaşımların sertliğinin ve akma mukavemetlerinin yaşlanma sürelerine göre değişimini gösteren eğriler Şekil 1.3'de verilmiştir.



**Şekil 1.3.** Aşırı doymuş katı çökeltinin sertliğinin değişik yaşlanma sürelerine göre değişimini gösteren eğriler<sup>(6)</sup>.

Yaşlanma işlemindeki etkin mekanizma çekirdeklenme ve büyümedir. Bu mekanizma da difüzyona bağlıdır. Düşük sıcaklıklarda difüzyon hızı düşük olduğundan çekirdeklenme hızı da nispeten düşük olur. Ancak yaşlanma süresi arttıkça oluşan çekirdek sayısı arttığından, uzun süreli yaşlanma sonucunda daha yüksek sertlik değerleri elde edilir. Yüksek sıcaklıklarda ise difüzyon hızı yüksek olduğundan, hem çekirdeklenme hızı hem de büyüme hızı yüksek olur. Bu nedenle, yüksek sıcaklıklarda yapılan yaşlanma işleminde kısa sürede meydana gelen tane büyümesinden dolayı alaşımın sertlik ve mukavemeti azalır<sup>(6)</sup>.



**Şekil 1.4.** Yaşlanma sırasında aşırı doymuş durumdaki alaşımların fiziksel özelliklerinde meydana gelen değişimleri gösteren eğriler <sup>(4)</sup>.

Yaşlandırma işlemi, sertlik ve dayanımda arzu edilen artma meydana gelinceye kadar, malzemeyi uygun sıcaklıkta tutmayı gerektirir. Alaşımda ince dağınık çökeltinin teşekkülü, çökeltme sertleşmesi işleminin amacıdır.

Aşırı doymuş çökelti kararsız olduğundan, ikinci fazın çökmesi için kesin eğilim vardır. İşlem sıcaklığında  $\alpha$  çözeltisinin kabul etmek istemediği fazla B atomları belirli kristalografik düzlemlere doğru difüzyon eğilimindedir<sup>(4)</sup>.

### 1.3.2. Yaşlandırma Koşulları

Çökelme sertleşmesinin meydana gelebilmesi için uygulanacak alaşımlarda bazı özellikler aranır. Bunlar;

- Denge diyagramı azalan sıcaklıkla, azalan katı çözeltiyi göstermelidir. Yani denge diyagramı bir solvüs eğrisine sahip olmalıdır.
- Matris yumuşak ve sünek, çözelti ise sert ve gevrek olmalıdır. Yaşlanabilir pek çok alaşımda çökelti sert intermetalik bir bileşiktir.
- Alaşım su alabilmelidir. (ikinci fazın soğuma ile engellenebilmesi)
- Çökelti maksimum mukavemet ve sertliği sağlayabilmek için matris yapısı ile uyumlu olmalıdır. Dahası, çökeltinin şekli, boyutu ve dağılımı kontrol edilebilmelidir.

Yaşlanma veya çökelme sertleşmesi metodu en çok alüminyum alaşımları için kullanılır. Bunun nedeni Cu, Mg içeren alaşımları yukarıda bulunan dört özelliğe kusursuz sahip olmalarıdır.

### 1.4. Bakır ve Bakır Alaşımları

Tarihin ilk zamanlarından orta çağa kadar, insanlar tarafından en fazla kullanılan metal olan bakır, demirin silah yapımında kullanılması ile yerini ona bırakmıştır. 19. yüzyılın sonuna doğru elektroteknikğin gelişmesi, elektriği çok iyi ileten saf bakıra duyulan gereksinmeyi giderek arttırmıştır. Öte yandan bu tür bakır daha çok elektrolitik arıtma, yani elektrik enerjisi yardımıyla elde edildiğinden, elektroteknik ve bakır üretimi birbirlerini karşılıklı destekleyerek gelişmişlerdir.

Bakır veya bakır alaşımları aşağıda sıralanan özelliklere sahiptir ve bu özelliklere bağlı olarak ihtiyaç duyulan yerlerde kullanılmaktadır.

- Elektrik ve ısı iletkenliği (saf bakır)
- Korozyon direnci (nikelli alaşımlar)
- Görünüş, mimari (bronz, pirinç v.s)
- Toksik olmaması (gıda, şeker sanayi)
- Yatak olmaya elverişlilik (kayma – sürtünme özelliği)

Daha birçok kullanım yerine göre uygun avantajlar sıralanabilir. Fakat bakır metalurjisinin pahalı bir teknoloji olması ve dünyadaki zengin bakır yataklarının artık iyice azalması, maliyet faktörlerinin etkinliğini arttırmıştır. Fiyat – avantaj dengesi, bakır ve alaşımlarının kullanımını sınırlamaktadır.

#### **1.4.1. Bakır-Çinko Alaşımları(Pirinçler)**

Bakır çinko ile her oranda alaşım yapabilmektedir. Fakat %45 'in üzerinde çinko içeren alaşımlar pirinç olarak adlandırılır. Çinko arttıkça kırmızıdan sarıya doğru renk değiştirir. Diyagrama bakıldığında bakırın zengin saha içinde Cu–Zn alaşımlarında  $\alpha$  katı çözültisi vardır.  $\alpha$  katı çözültisi, çelikteki  $\gamma$  katı çözültisine benzer olarak yüz merkezli kübiktir. Katı çözülti, bakır ve çinko atomlarının çapları birbirine yakın olduğundan yer alan katı çözültisi oluştururlar ve kristal örgüde bakırın yerine çinko geçebilir. Çinko atom çapı, bakıra göre daha büyük olduğundan, atomlar arası mesafe artar ve örgü parametresinde kısmen büyümeye gözlenir. Böylece meydana gelen gerilmeler, sertliği artırır.

Metalografik yapılarına göre ikiye ayrılırlar:

**$\alpha$  pirinci:** % 62 'den fazla bakır içeren ve yalnız  $\alpha$  katı eriyik kristallerini içeren yumuşak alaşımdır. Bileşiminde maksimum %37 Zn vardır. Bakır miktarına göre yer değiştirir.

Döküm veya plastik şekil verme sonucu oluşan artık gerilmelerden doğan mevsim kırılganlığı,  $\alpha$  pirinçlerinde sıkça görülür. Diğer bir kötü özelliği çinkosuzlaşmasıdır. Bu olay kalay ilavesi ile giderilmeye çalışılır.

**$\alpha+\beta$  pirinci:** %62'den az bakır içerir, serttir ve döküm alaşımıdır.  $C_2$ 'de ilk oluşan faz  $\beta$  'dır. Sıcaklık T değerinin altına düşünce  $\alpha$  tane sınırlarında ve  $\beta$  'nın artan bölgelerinde çöker. Oda sıcaklığında  $\alpha+\beta$  vardır. Yalnız 454  $^{\circ}C$  'de  $\beta$  ' dönüşümü vardır. % 38–48 arası çinko içerirler.  $\beta$  ' ,  $\alpha$  'dan daha sert ve gevrektr. Bu nedenle soğuk şekillendirilmesi zordur. Yüksek sıcaklıklarda  $\beta$  fazının plastisitesi yüksek olduğundan plastik şekil verilebilir. Sarı pirinç veya Muntz Metali olarak bilinir(çoğunlukla % 60 Cu - % 40 Zn). Kurşun ilavesi ile işlenebilme kabiliyeti arttırılır. Bakır oranı % 56 – 79 ise bunlar yüksek mukavemetli pirinçlerdir. Bunlara aşağıdaki elementler ilave edilir.

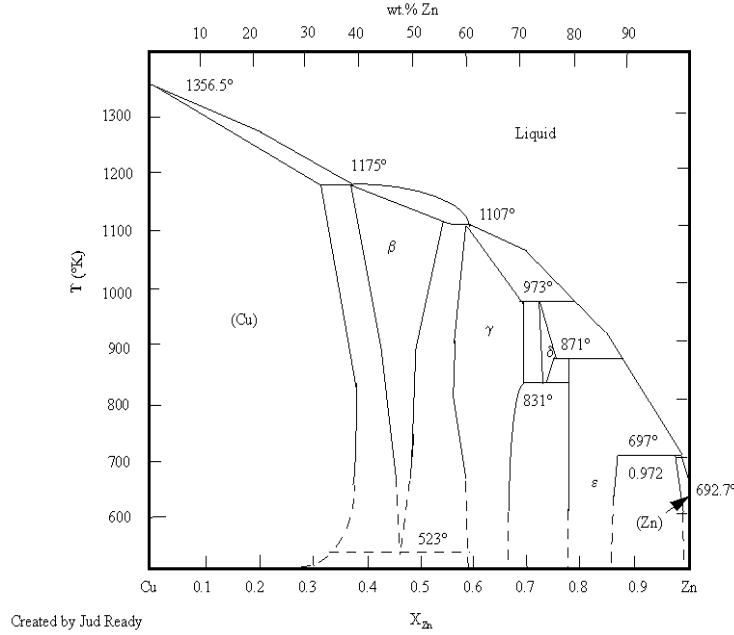
#### **Bakır-Çinko alaşımlarına diğer elementlerin etkisi:**

**Silisyum:** Sertliği arttırır. Torna işlemini zorlaştırıcı etkisi vardır.

**Kalay:** Bakır ile  $\delta$  fazını oluşturur. Akma ve kopma mukavemetini, yüzde uzamayı ve darbe direncini değiştirmeden arttırır. Denizel ortamlarda korozyon direncini arttırır.

**Kurşun:** Çözünmez, ayrı bir faz olarak bulunur. Maksimum %0.2 ile sınırlandırılmıştır. % 0.1 'in altında kalırsa uzamayı artırır.

**Nikel:** Mukavemeti azaltır. Sünekliliği artırır. Tane küçültücüdür. Özellikle denizel ortamlarda korozyon direncini artırır.



**Şekil 1.5.** Cu–Zn denge diyagramı.

#### 1.4.2. Bakır–Alüminyum Alaşımları

Bu alaşımlar “Alüminyum Bronzu” olarak bilinirler ve yaklaşık %15 alüminyuma kadar değişik bileşimlerde olabilir. Şekil 1.7’deki diyagramdan da görüldüğü gibi,  $\alpha$  katı eriyiğinin çözünürlük sınırı, 1035 °C ‘de %7.4 Al ve 565 °C ‘de % 9.4 Al ‘dir. 1035 °C ‘de %9 Al ( $\beta$ ) fazının hakim olduğu noktanın başlangıcı, 565 °C ve % 11.8 Al ise ötektoid dönüşüm noktasıdır. Alüminyum bronzları ikiye ayrılır:

**I.GRUP:** %4–9 Al içerir.  $\alpha$  katı eriyiğinden oluşur. Homojen yapıya sahiptirler. Oldukça sünektirler. Mukavemetlerini arttırmak için ısıtıl işlem uygulanmaz. Nikel, demir veya Fe – Mn ilave edilir. II. Gruba göre korozyon dirençleri de fazladır.

**II.GRUP:** %9–14 Al içerir. (  $\alpha+\beta$  ) fazındadır. İlk olarak  $\beta$  oluşur. Sıcaklığın düşmesi ile ötektik reaksiyon sonucu  $\alpha$  oluşur. 565 °C 'de ötektoid dönüşümü ile sert, kırılgan ve mikroyapıda küçük tanecikler halinde dağılmış  $\gamma$  çökelir. Hızlı soğuma ile bu olay kaldırılıp sadece  $\alpha$  ve  $\beta$  oluşması sağlanır. Ama soğuma hızı kontrol edilemez. Bu nedenle nikel ve demir ilave edilir ve ötektoid sıcaklığı düşürülür. Böylece istenmeyen  $\gamma$  tanecikleri giderilir. Isıl işlemle de  $\gamma$  fazı giderilebilir.

Alüminyum bronzlarının özellikleri şöyledir:

- Alüminyum bronzları yüksek ergime sıcaklığına sahiptir (1038 °C)
- Dar katılaşma aralığı vardır (likidus – solidus arası yaklaşık 11°C)
- Sıcaklığın artması ile  $\alpha$  ve  $\alpha+\beta$  fazlarının çözünürlük sınırları değişir.
- 565 °C ve % 11.8 alüminyumda meydana gelen ötektoid dönüşüm, ısıtıl işlemle sertleştirilebilme karakteristiğini vurgular.

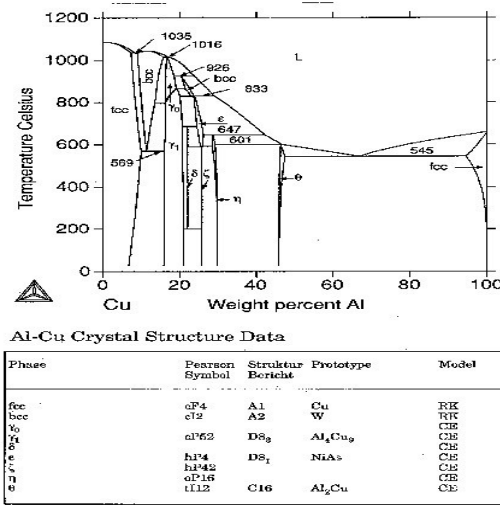
#### **Alüminyum Bronzlarına Alaşım Elementlerinin Etkisi:**

**Kurşun:** Tornada mükemmel işlenebilme ve yatak olarak kayma özelliği verir. Bu nedenle dişli çarkları, volanların ve benzer parçaların dökümünde kurşun ilave edilir. Mikroyapı içinde ayrı fazda ve yumuşaktır.

**Demir:** Tane küçültücü olarak kullanılır ve bu da çekme mukavemetini artırır.

**Nikel:** % 5 'e kadar kullanılır ve çekme mukavemetiyle sünekliliği artırır. Döküm alaşımlarına az miktarda ilaveler mekanik özellikleri iyileştirir.

**Silisyum:** Mükemmel akıcılık ve dökülebilirlik özelliği kazandırır. Dikkat edilmesi gereken nokta oksit filmi oluşturmastır.



N.Saunders, unpublished work (1991)

**Şekil 1.6.** Al-Cu denge diyagramı.

#### 1.4.3. Bakır-Kalay Alaşımları

Denge diyagramından da görüldüğü gibi kalayın çözünürlük sınırı 20 °C' de % 1'den az iken, sıcaklığın artışı ile hızla artarak ötektoid yatayında % 15.8 kalay olur.

Bakır – kalay alaşımları bakırca zengin  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\delta$ ,  $\epsilon$  fazlarından oluşur. Dökülmüş alaşım  $\alpha$ , katı eriyik matrisi içinde tipik öbeklenme ve dendrit içeren tanecikler şeklinde oluşan  $\alpha+\beta$  ötektoid yapısını gösterir. Bu faz sert

ve mavi renktedir. Ötektoid yapıya mikroskopta büyütülerek bakıldığında,  $\delta$  ana fazı içinde  $\alpha$  hücreleri şeklinde görülür. Yüksek sıcaklıklarda bekletilen alaşımlarda kalay çözünürlüğünü azaltan  $\alpha+\delta$  çökmesi oluşur.

Kalay miktarının artması ile kalayca zengin dendritler arası bölgeler oluşur. Düşük kalaylı alaşımlarda ise dendrit içerisinde çözünmüş kalayın yüksek sıcaklıklarda uzun bekletmelerle dendritler arası bölgelere difüzyonu sağlanır. Bunların iyi yatak malzemesi olmamasının nedeni yumuşak ana yapı içindeki  $\delta$  çökeltileridir.

#### **Bakır-Kalay Alaşımlarına Diğer Elementlerin Etkisi:**

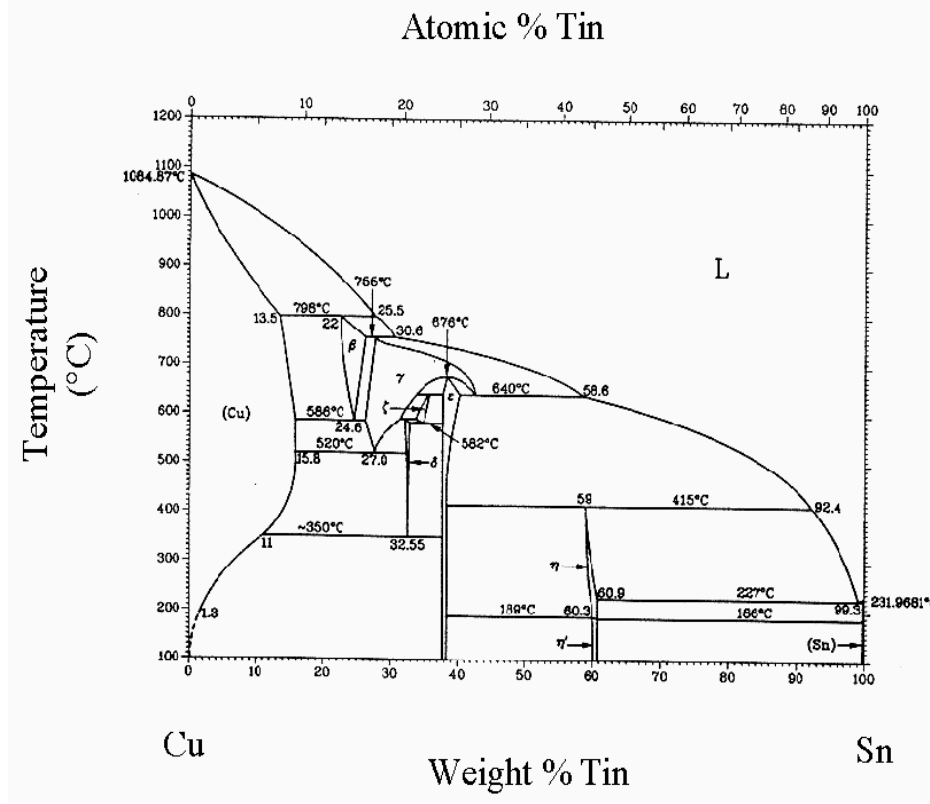
**Kurşun:** Yapıda çözünmeyen yığıntılar şeklinde bulunur. Tornada iyi işlenebilme, yatak malzemesi ve basınca dayanıklılık özelliği kazandırır.

**Demir:** Maksimum %0.2 oranında bulunur. Çekme mukavemetini ve sertliği artırır. Fakat sünekliği düşer.

**Çinko:** Sertleşme özelliği verir. Akışkanlığı mükemmel derecede artırır. Deoksidasyon özelliği vardır.

**Fosfor:** Deoksidasyon amacıyla kullanılır. Alaşımı daha sert ve kırılgan yapar.

**Nikel:** Sertliği ve mukavemeti artırır. Maksimum %6'ya kadar kullanılır. Yüksek sıcaklıkta bir katı metal ağı oluşturarak donma noktasını, porozite miktarını düşürür. Basınç altında kullanılan malzemelerde sızmayı azaltarak dayanıklılığı artırır. Kurşun segregasyonunu önler.



**Şekil 1.7.** Cu-Sn denge diyagramı.

#### 1.4.4. Bakır - Nikel Alaşımları

Katı ve sıvı halde her oranda birbirleri içinde sürekli çözünerek sürekli katı eriyik oluştururlar. Yüksek sıcaklıklarda mukavemet özellikleri ve korozyon dirençleri çok iyidir. Bu sebeple buhar kazanları tesisatlarında, kimyasal tesislerde, kondenser boru malzemelerinde ve korozyon direncinin yüksek olması istenen yerlerde kullanılır.

Nikel miktarı %30'a kadar çıkabilir. %0.5-1 demir ilavesi korozyon direncini azaltır. %25'den fazla nikel içeren alaşımlar para yapımında kullanılır.

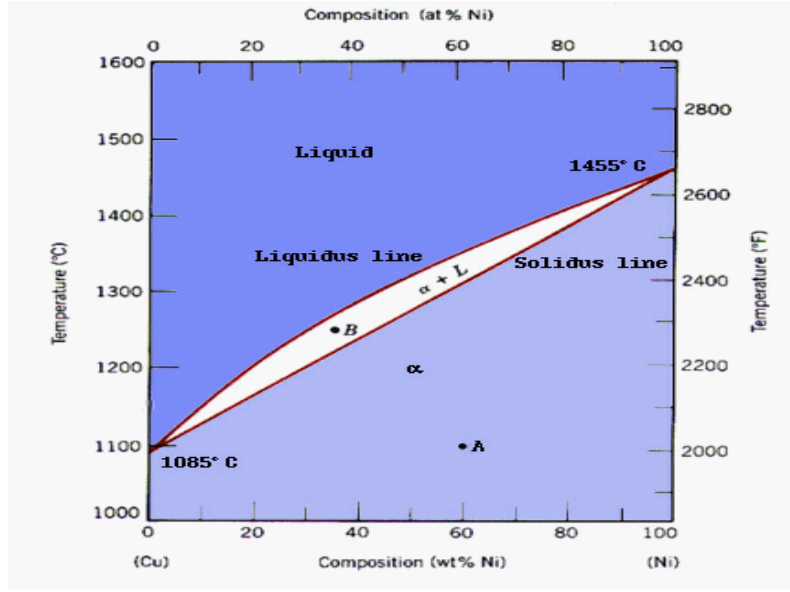
Yüksek nikelli alaşımlara Mn ilavesiyle elektrik direnç malzemesi teller üretilir. Çok az Si deoksidasyon amacıyla kullanılır. Bu alaşımlar özellikle 0 °C'nin altında yüksek mukavemetlidir.

#### **1.4.5. Bakır - Nikel - Çinko Alaşımları (Nikel Gümüşü)**

Nikel gümüşü Cu-Ni-Zn alaşımıdır. Bakır ana elementtir. Ni arttıkça ergime sıcaklığı yükselir. Korozyon direncini artırır. Bakırın rengini yok ederek gümüş rengini verir. Mukavemetine olumlu etki yapar. Ancak elektrik iletkenliği düşer. Çinko mukavemeti artırır. Maliyeti azaltır. Çinko % 37 'i geçince süneklik azalır. Nikel gümüşleri döküm ve işlem alaşımı olarak ikiye ayrılır;

**Döküm alaşımı:** Sert ve iki fazlıdır. % 37'den fazla çinko içerir.

**İşlem alaşımı:** Yumuşak ve deformasyon kabiliyetleri iyidir. Tek fazlı yapıdır.



Şekil 1.8. Cu-Ni denge diyagramı.

### 1.5. Elektriksel İletkenlik

Pek çok uygulamalarda malzemelerin elektriksel davranışı mekanik davranışlardan daha önemlidir. Uzun mesafelere akımı ileten metal tel, ısınma sonucu oluşan ısınma kaybını azaltmak için yüksek bir elektrik iletkenliğe sahip olmalıdır.

Elektrik ve elektronik uygulamalar için malzeme seçmek ve kullanmak elektrik iletkenliği gibi özelliklerin nasıl üretildiğinin ve kontrol edildiğinin anlaşılmasını gerektirir. Ayrıca elektriksel davranışın malzemenin yapısından, malzemenin işlenişinden ve malzemenin maruz kaldığı çevreden etkilendiği bilinmelidir.

### 1.5.1. Metallerin İletkenliklerinin Kontrolü

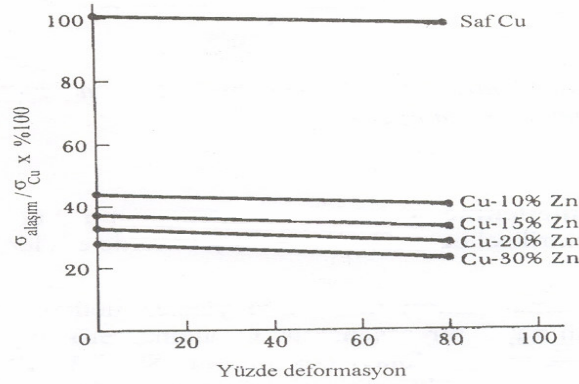
**Sıcaklık Etkisi:** Metalin sıcaklığı yükseldiğinde, ısı enerjisi atomun titreşmesine neden olur. Herhangi bir anda atom denge pozisyonunda olmayabilir ve bu nedenle elektronlarla etkileşir ve elektronları dağıtır. Ortalama serbest yol ve elektronların hareketliliği azalır ve özdirenç artar. Sıcaklıkla özdirençteki değişim, aşağıdaki eşitlikle tahmin edilebilir.

$$\rho = \rho_r (1 + \alpha \Delta T)$$

Burada  $\rho$  oda sıcaklığındaki özdirençtir.  $\Delta T$  ilgili sıcaklık ve oda sıcaklığı arasındaki sıcaklık farkıdır ve  $\alpha$  sıcaklık direnç katsayısıdır<sup>(11)</sup>.

**İşlem ve Mukavemetlenme Etkisi:** Mukavemetlenme mekanizmaları ve metal işlem teknikleri bir metalin elektriksel özelliklerini farklı şekillerde etkiler. Katı eriyik mukavemetlenmesi metallerde yüksek iletkenliklere sahip yüksek bir dayanım elde etmek için zayıf bir seçenektir. Ortalama serbest yol, arayer ve yer alan atomlarının rastgele dağılımından dolayı çok kısadır.

Yaşlandırma ve dağılım mukavemetlenmesi iletkenliği katı eriyik mukavemetlenmesinden daha az azaltmaktadır<sup>(11)</sup>.



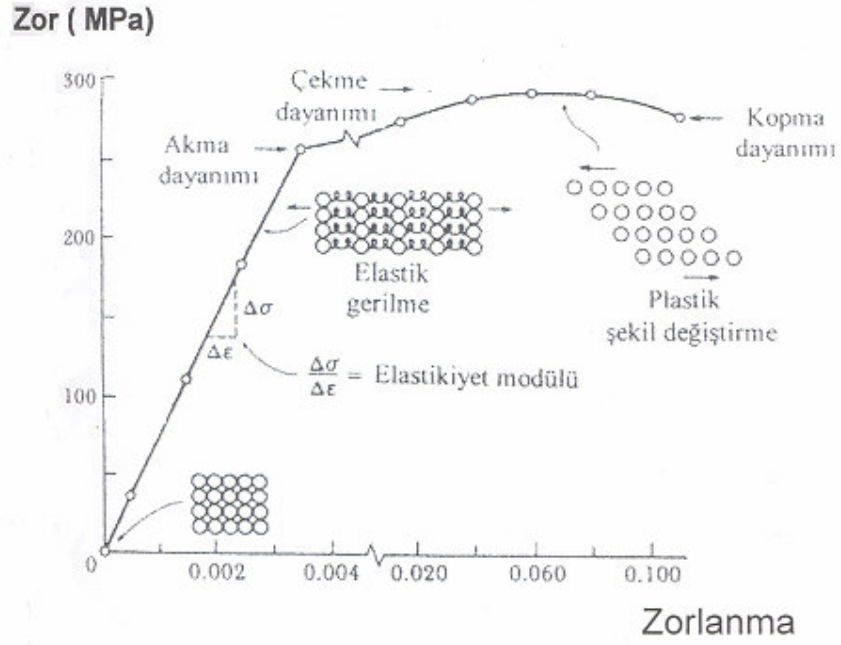
**Şekil 1.9.** Katı eriyik mukavemetlenmesinin ve soğuk şekillendirmenin bakırın elektrik iletkenliği üzerine etkisi<sup>(11)</sup>.

## 1.6. Deformasyon

Bir metale veya alaşıma, bir eksenli çekme veya basma kuvveti uygulandığında, metalde veya alaşımda biçim değiştirme meydana gelir. Kuvvet kaldırıldığında numuneler eski boyutlarına dönerse; metal veya alaşımanın elastik şekil değiştirdiği söylenir<sup>(12,13)</sup>. Zor – zorlanma eğrisinin bu elastik kısmında oluşan numunedeki uzama eski haline dönebilir. Elastik şekil değiştirme sırasında, numunenin atomları ilk yerlerinden oynatıldıkları halde bu oynama onların yerlerini değiştirecek kadar fazla değildir. Bu nedenle numunelerin elastik şekil değiştirmesine neden olan kuvvet kaldırıldığında numune atomları ilk yerlerine döner ve numune başlangıçtaki şeklini alır<sup>(12,13)</sup>.

Metal veya alaşım, tam olarak eski boyutlarına dönemeyecek kadar şekil değiştirdiyse; numunelerin plastik şekil değiştirdikleri söylenir<sup>(12,13)</sup>. Büyük kuvvetler uygulandığında malzeme plastik davranış gösterir. Gerilme arttığında dislokasyonlar hareket etmeye başlar. Kayma olur ve malzeme plastik (kalıcı) olarak şekil değiştirir. Kuvvet kaldırıldığında elastik şekil değişikliği ortadan kalkarken, kaymanın neden olduğu şekil değiştirme kalıcıdır. Kaymanın başladığı nokta elastik ve plastik davranışı ayıran noktadır<sup>(11)</sup>.

Dislokasyonlar, kusursuz kristaldeki örgü noktalarından geçen çizgiler boyunca oluşan kusurlardır<sup>(14)</sup>. Dislokasyon sonucu atomlar denge konumlarından ayrıldıklarından, çizgi çevresinde gerilmeler doğar, dolayısıyla şekil değiştirme enerjisi depo edilir. Bu kusurlar kristallerde; dış zor, ısı değişimi gibi etkilerle ortaya çıkarlar. Şekil 1.10'da bir alüminyum alaşımı için zor-zorlanma eğrisi verilmiştir.



**Şekil 1.10.** Bir alüminyum alaşımı için zor-zorlanma eğrisi<sup>(11)</sup>.

Malzemeye uygulanan deformasyon, malzemenin mekanik ve fiziksel davranışları üzerinde büyük bir etkiye sahiptir. Kristal örgü, katının fiziksel özelliklerini doğrudan etkiler. Elektriksel iletkenlik, ısı iletkenliği, genleşme katsayısı, ısı sığası ve esneklik gibi fiziksel özellikler katının kristal örgüsünün cinsine bağlıdır<sup>(15)</sup>.

## **2. MATERYAL ve YÖNTEM**

### **2.1. Materyal**

Bu çalışmada Cu-%25Mn-%11Al alaşımına ısıt işlemler uygulanarak; alaşımın mikro yapısında meydana gelen değişimlerin incelenmesi için JEOL-JSM-5600 30Kv hızlandırma gerilimine sahip taramalı elektron mikroskobu, zor-zorlanma davranışının incelenmesi için İnstron sıkıştırma ve çekme test makinesi ve elektriksel özelliklerinin belirlenmesi için Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümü araştırma laboratuvarında bulunan Lake-shore 331 sıcaklık kontrol edilebilir cihaz ile elektriksel direnç ölçümü incelenmiştir.

#### **2.1.1. Numunelerin Hazırlanması**

Bu çalışmada incelenen Cu-%25Mn-%11Al alaşımı Tübitak Gebze Araştırma Merkezinde hazırlanmıştır. %99.9 saflık derecesinde toz halinde bulunan Cu, Mn ve Al elementleri argon atmosferinde bir araya getirilip yüksek sıcaklıkta eritilerek 1 cm çapında ve 10 cm uzunluğunda silindirik çubuk halinde dökülmüştür.

Silindirik çubuk halinde bulunan alaşımdan, elmas bıçaklı kesicilerle uygun boyutta kesilen numuneler, zor-zorlanma davranışı ve elektriksel direnç özelliklerini incelemek üzere ısıt işlemlere tabi tutuldular. Isıt işlem sırasında, yüksek sıcaklıklarda malzemedeki oksitlenmeyi önlemek amacıyla,

numuneler yüksek sıcaklıklara dayanabilen kuartz cam tüpler içine konuldu ve daha sonra ısıt işlemler uygulandı.

Öncelikle alaşımdan alınan bir adet numune 900 °C 'de 1 saat süre ile homojenleştirilerek oda sıcaklığındaki suda soğutuldu. Daha sonra soğutma hızının etkisini incelemek üzere alaşımdan alınan diğer numune 900 °C 'de 1 saat homojenleştirilerek fırında yavaş soğumaya bırakıldı.

### **2.1.2. Zor-Zorlanma Deneyleri İçin Numunelerin Hazırlanması**

Zor-zorlanma deneyleri için; alaşımdan ısıt işleme tabi tutulacak 2 adet numune elmas bıçaklı uygun kesicilerle 4 x 4 x 8 mm<sup>3</sup> boyutlarında dikdörtgen prizması şeklinde kesilerek hazırlandı.

Daha sonra ısıt işlem uygulanmış bu numunelere Instron sıkıştırma ve çekme test makinesi ile oda sıcaklığında dakikada 0.4 mm hızla basma zoru uygulanarak zor-zorlanma deneyleri yapıldı.

### **2.1.3. Taramalı Elektron Mikroskobu Gözlemleri İçin Numunelerin**

#### **Hazırlanması**

Taramalı elektron mikroskobu ile yapılacak yüzey gözlemleri için; ısıt işlem görmüş numuneler değişik kalınlıktaki su zımparaları ile (800 ve 1200'lük) kalından inceye doğru gidilerek zımparalandı ve bu şekilde yüzeydeki pürüzler ve kalın çizgiler ortadan kaldırılmış oldu. Daha sonra ise parlatma cihazı kullanılarak 6 ve 3 mikronluk elmas pastalarla numune yüzeyleri parlatıldı.

Mekanik olarak parlatılan yüzeyler 10 ml HCl, 2,5 gram Fe(NO)<sub>3</sub> ve 40 ml H<sub>2</sub>O karışımından oluşan çözelti içerisinde oda sıcaklığında birkaç dakika bekleterek dağlandı. Numunelerin yüzeylerinde oluşan mikroyapı karakteristikleri 30 kV gücünde Jeol 5600 SEM ile incelendi.

#### **2.1.4. Elektriksel Direnç Ölçümleri İçin Numunelerin Hazırlanması**

Elektriksel direnç ölçümleri için numuneler elmas kesici ile kesildi ve yüzeyleri 6 ile 3 mikronluk elmas pastalarla parlatıldı. Direnç ölçümleri için standart dört nokta tekniği ile Keithley 220 programlanabilir akım kaynağı ve Keithley 182 dijital duyarlı voltmetre kullanıldı.

### **2.2. Yöntem**

#### **2.2.1. SEM ve EDS**

Elektrooptik prensipler çerçevesinde tasarlanmış taramalı elektron mikroskobu (SEM), birçok dalda araştırma-geliştirme çalışmalarının kullanımı yanında; sanayi, fizik, biyoloji ve tıpta yaygın olarak kullanılmaktadır.

SEM, Katod Işınları Tüpü mantığı ile çalışmaktadır. Numuneler havası boşaltılmış (vakum yapılarak) bir tüpe yerleştirilir.

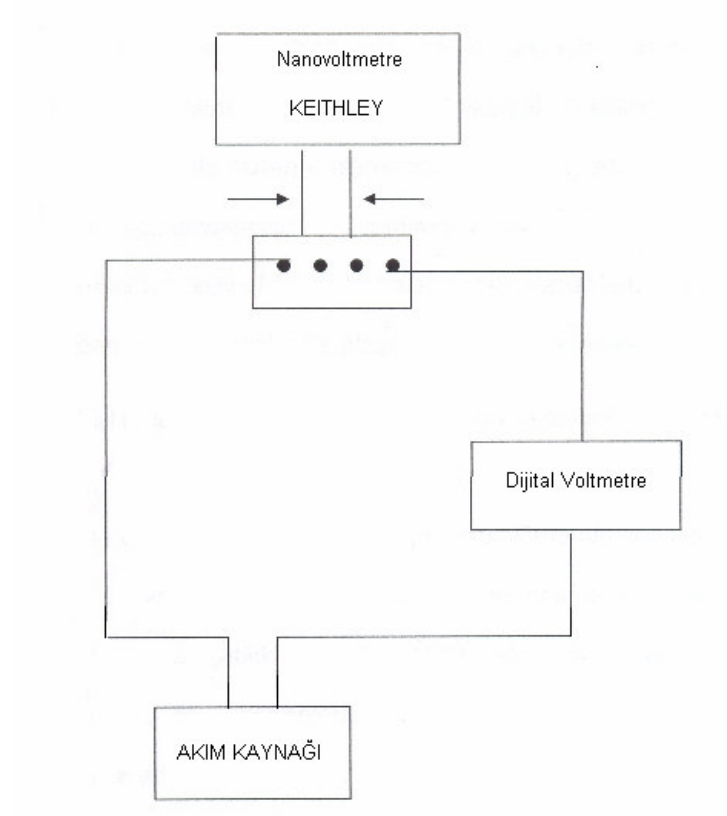
Elektron demeti uygun potansiyel altında hızlandırılıp, numune üzerine düşürülür. Elektron demeti-numune etkileşiminden ortaya çıkan sinyallerin uygun algılayıcılar tarafından algılandıktan sonra çeviriciler tarafından

görüntüye düşürülmesi yolu ile yüzey incelemesi yapılacak numunenin yüzey görüntüsü elde edilir<sup>(16)</sup>.

SEM ile birlikte EDS ( Enerji Dağılımlı X-Işınları Spektroskopisi) tekniği de kullanılmaktadır. EDS tekniği sayesinde SEM içerisinde çalışılan numunelerin daha geniş yüzeylerinden ( 0.5 – 3 mikrometre çapında) elementlerin kütle oranları tam olarak bulunabilmektedir. EDS tekniği x-ışınları prensibi ile çalışmaktadır. Buna göre numune üzerine düşürülmüş olan elektron ışınlarından karakteristik x-ışınları spektrumu meydana gelmektedir. Elde edilen bu spektrum grafiğinden de, hangi alaşım elementinin hangi pike ait olduğu ve aralarındaki kütle oranları bulunabilmektedir. Bu sayede alaşımın herhangi bir bölgesindeki elementlerin yüzdeleri bulunmuş olmaktadır<sup>(17)</sup>.

### **2.2.2. Elektriksel Direnç Ölçümü Deney Düzeneği ve Yöntemi**

Elektriksel direnç ölçümleri standart dört nokta tekniği ile Keithley 220 programlanabilir akım kaynağı ve Keithley 182 dijital duyarlı voltmetre kullanılarak yapılmıştır. Sıcaklık değerleri için ölçümler 10K-100K arasındadır. Elektriksel direnç ölçme düzeneğinin diyagramı Şekil 2.1' de verilmiştir<sup>(18)</sup>.



**Şekil 2.1.** Elektriksel direnç ölçüm düzeneği.

### 3. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Alaşımın mekanik davranışları ve mekanik davranışları üzerinde ısıtma işlemlerin etkisi, elektriksel özellikleri ve elektriksel özellikleri üzerinde ısıtma işlemlerin etkisi, Çizelge 3.1 'de verilen numunelerin zor-zorlanma deneyleri, elektriksel ölçüm deneyleri ve SEM çalışmaları incelendi.

**Çizelge 3.1.** Cu-%25Mn-%11Al alaşımından aynı ısıtma işlem ve farklı soğutma uygulanarak hazırlanan numuneler.

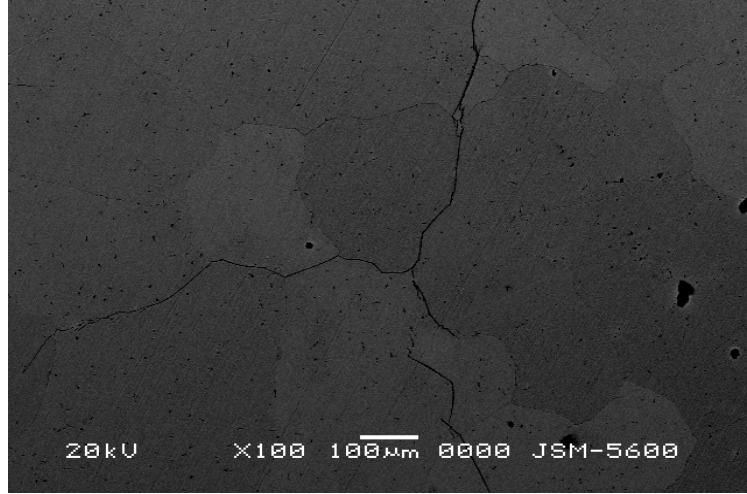
| Numune No | Homojenleştirme Sıcaklığı (°C) | Homojenleştirme Süresi (dakika) | Soğutma İşlemi                |
|-----------|--------------------------------|---------------------------------|-------------------------------|
| N1        | 900                            | 60                              | Oda sıcaklığında suda soğutma |
| N2        | 900                            | 60                              | Fırında soğutma               |

#### 3.1. Cu-%25Mn-%11Al Alaşımının Mikro Yapısı Üzerinde

##### Isıtma İşlemlerin Etkisi

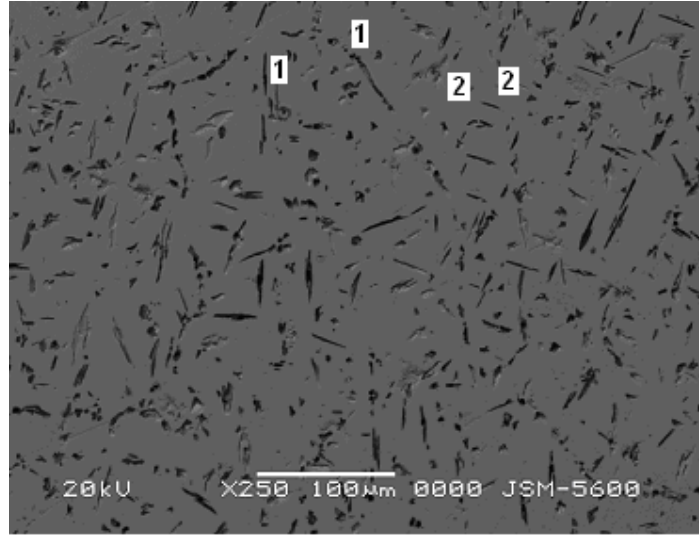
Alaşımın mikro yapısının üzerinde ısıtma işlemlerin etkisi incelemek amacıyla, Çizelge 3.1'de verildiği gibi ısıtma işlemlere tabi tutulan numuneler SEM ile incelendi.

900 °C de 1 saat ısıtma işlemine tabi tutulan ve oda sıcaklığındaki suda soğutulan N1 numunesine ait SEM fotoğrafı Şekil 3.1.a'da verildi.



**Şekil 3.1.a.** Oda sıcaklığında suda soğutma işlemine tabi tutulan N1 numunesinin austenite tane yapısı.

900 °C'de 1 saat ısıtılma işlemine tabi tutulan ve fırında yavaş soğutulan N2 numunesine ait SEM fotoğrafı Şekil 3.1.b'de verildi.



**Şekil 3.1.b.** Fırında yavaş soğutma işlemine tabi tutulan N2 numunesine ait SEM fotoğrafı.

Çizelge 3.2’de N2 numunesine ait EDS değerleri verilmiştir.

**Çizelge 3.2.** N2 numunesinin ısıtıl işlem davranışlarında işaretlenmiş fazların EDS analizleri.

| <b><u>Numune</u></b>                    | <b><u>Faz no</u></b> | <b><u>Cu(%)</u></b> | <b><u>Mn(%)</u></b> | <b><u>Al(%)</u></b> |
|-----------------------------------------|----------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| (N2)<br>Fırında Soğutma<br>Şekil 3.1.b. | 1                    | 67.460              | 22.430              | 10.110              |
|                                         | 2                    | 64.805              | 31.196              | 3.999               |

N1 numunesinin oda sıcaklığında suda soğutma işleminde 900 °C’de 1 saat ısıtıl işlemine tabi tutuldu ve bu ısıtıl işlem sonucunda alaşımlın yüzey incelemesinde austenite fazda kaldığı ve numunede tanelerin (grains) oluştuğu gözlemlendi. Tane sınırları genelde safsızlık atomları, atomlar arası boşluklar ve dislokasyonlar gibi kusurlar içerdığı için tane içlerinde olduğu gibi özdeş atom dizilimlerinden söz edilemez<sup>(2)</sup>. Austenite faza ait olan tanelerin boyutları homojenleştirme süresine, sıcaklığına ve soğutma şekline bağlı olarak değişir.

N2 numunesinin fırında oda sıcaklığına soğutma işleminde 900 °C’de 1 saat ısıtıl işlemine tabi tutuldu ve bu ısıtıl işlem sonucunda alaşımlın yüzey incelemesinde çökelti fazı gözlemlendi.

### 3.2. Cu-%25Mn-%11Al Alaşımının Mekanik Davranışları

Cu-%25Mn-%11Al alaşımına ait N1 ve N2 numunelerinin mekanik davranışları ve bu numunelerin mekanik davranışları üzerinde austenite ve çökelme fazının etkisi zor-zorlanma deneyleri ile incelenerek karşılaştırıldı.

Yapılan deneyde her iki numune basma zoruna maruz bırakıldı. Birçok çalışmada ısıt ışleme göre değişen tane boyutunun, alaşımların mekanik özelliklerini nasıl değiştirdiği gösterilmiştir <sup>(19,20,21)</sup>.

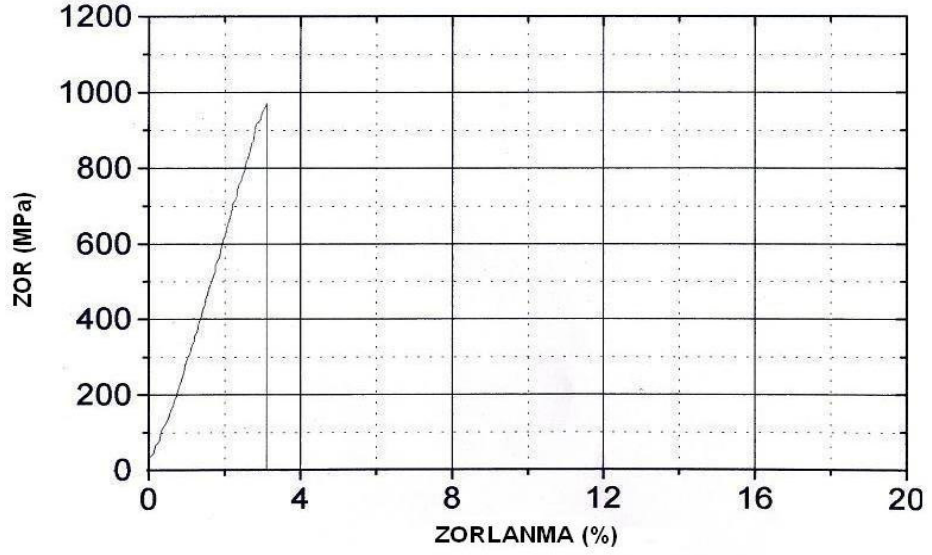
Bir alaşımda bulunan noktasal kusurlar, dislokasyonlar ve safsızlık atomlarının kristal içerisindeki tanecik içlerinden ziyade tane sınırlarında toplanacağı düşünölr. Küçük tane boyutlu malzemede daha fazla tane sınırı bulunacağından ve bu bölgelerde toplanan kusurların alaşımın mekanik özelliklerini etkilediği bilindiğinden, kristal taneleri ne kadar küçük olursa alaşımın uygulanan zora karşı zorlanması daha fazla olur sonucuna varılır. Bugüne kadar ısıt işlem süresinin ve kristal tane boyutlarının alaşımın mekanik özelliklerine etkisi üzerine bir çok çalışma yapılmış, tane boyutlarının özellikle zor-zorlanma davranışında etkili olduğu sonucuna varılmıştır<sup>(20,21,22)</sup>.

Cu-%25Mn-%11Al alaşımında, austenite tane büyüklüklerinin alaşımın mekanik özellikleri üzerinde etkisi mekanik test yöntemleri ile araştırıldı. Austenite tane büyüklüğünün, alaşımın mekanik özelliklerini nasıl değiştirdiği incelenirken kristal taneciklerini elde etmek için alaşıma uygulanan ısıt işlem sıcaklığı ve süresinin, tane büyüklüğü üzerinde etkili olduğu anlaşıldı.

Isıl işlem sıcaklığı sabit tutularak yaşlandırma süresinin değiştirilmesiyle elde edilen numuneler üzerinde yapılan basma zoru deneyleri sonucunda, yaşlandırma süresindeki artışın alaşımın basma dayanımını yükseltirken zorlanma miktarını düşürdüğü görüldü. Bu durumda, alaşımda bulunan noktasal kusurlar, dislokasyonlar ve safsızlık atomlarının kristal içerisindeki tane içlerinden ziyade tane sınırlarında toplanacağı düşünüldüğünden, taneciklerin küçük olması alaşımın zorlanmasını artırır ve kristal tane boyutları alaşımın mekanik özelliklerini değiştirir sonucuna varıldı.



**Şekil 3.2.a.** Suda soğutulan N1 numunesinin zor-zorlanma eğrisi.



**Şekil 3.2.b.** Fırında soğutulan N2 numunesinin zor-zorlanma eğrisi.

Oda sıcaklığında suda soğutulan N1 numunesinin basma zoru davranışını gösteren zor-zorlanma eğrisi Şekil 3.2.a'da verildi. Fırında oda sıcaklığına kadar soğutulan N2 numunesinin basma zoru davranışını gösteren zor-zorlanma eğrisi Şekil 3.2.b'de verildi. Şekil 3.2.a ve Şekil 3.2.b 'de görüldüğü gibi elastik zorlanmanın sona erdiği noktalar karşılaştırıldığında çökelti fazı içeren N2 numunesinin akma dayanımının saf austenite fazda bulunan N1 numunesine göre daha büyük olduğu görüldü.

Austenite fazda bulunan tane sınırları, noktasal kusurlar, safsızlık atomları ve dislokasyonlar gibi kusurların en çok bulunduğu bölgelerdir. Bunun yanında tanelerin içinde ise bu kusurlar daha az bulunur<sup>(23)</sup>. Kusurlardan dolayı daha çok taneye sahip olan numunelerin aynı zora karşı zorlanması büyük olacaktır.

Bir ana faz içinde çok küçük parçacıklar halinde çökelmiş ikinci bir faz şekil değiştirmeyi çok kısıtlar, dolayısıyla sertlik ve mukavemet artar. Bu ikinci faz genellikle aşırı doymuş bir fazdan kontrollü çökeltme yöntemi ile elde edilir. Bu yöntem birbirlerini sıcaklığa bağlı olarak sınırlı oranda eriten sistemlere uygulanır.

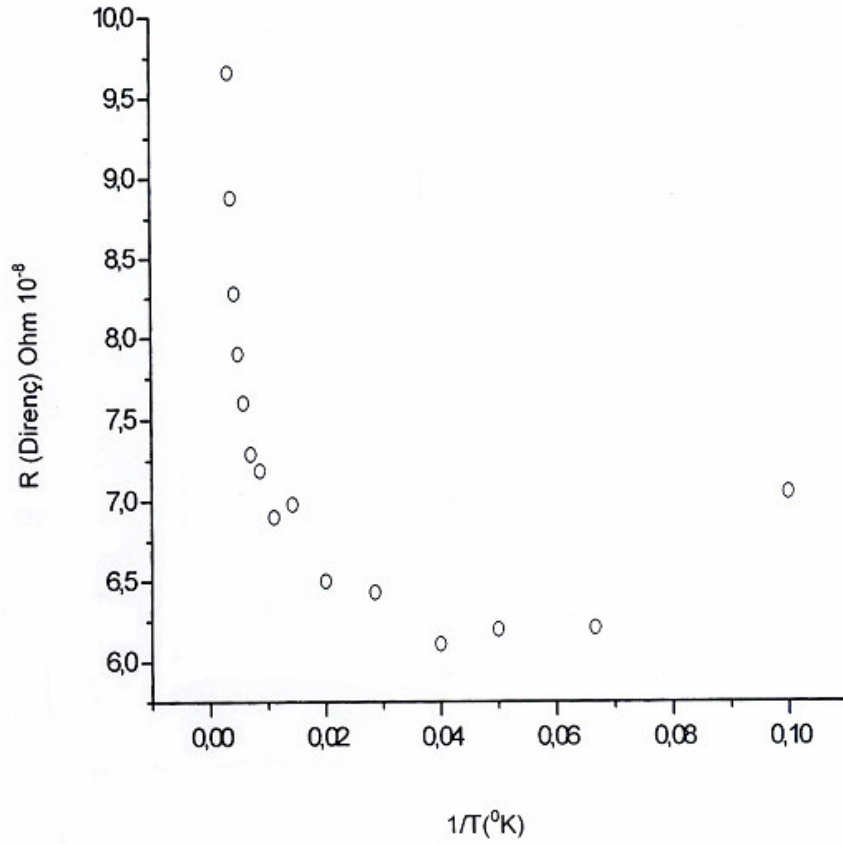
Oda sıcaklığında suda soğutulan ve saf austenite faz yapısına sahip olan N1 numunesi için akma dayanımı 750 MPa civarında iken fırında soğutulan ve çökelti fazı içeren N2 numunesinin akma dayanımı 980 MPa'dır.

Şekil 3.2.a ve Şekil 3.2.b'de görülen, 900 °C'de 1 saat homojenleştirilen daha sonra iki farklı soğutma işlemi uygulanan numunelerin farklı zorlanma davranışı sergilediği görülmektedir. Aynı ısıtma işlemi uygulanmasına rağmen oda sıcaklığında soğutulan numunenin (N1) akma dayanımı, fırında yavaş soğumaya bırakılan numunenin (N2) akma dayanımından daha düşüktür. Bu durumda soğutma hızı alaşımın mekanik davranışında etkilidir ve soğutma hızı artarken paralelinde akma dayanımı azalır. Yavaş soğutulmuş veya hızlı soğutulmuş numunelerin zor-zorlanma davranışı, bu esnada oluşan fazların türüne bağlıdır<sup>(24)</sup>. Diğer taraftan, soğutma hızından kaynaklanan akma dayanımındaki artış farklı alaşımlarda da gözlenmiştir<sup>(25,26)</sup>.

N2 numunesinde oluşan çökelti fazı dislokasyonun hareketini engelleyici şekilde davranmıştır ve böyle bir engelleme şekil değiştirmeye mukavemet sağlamıştır, dolayısıyla basma dayanımı ve sertlik artmıştır.

### 3.3. Cu-%25Mn-%11Al Alaşımının Elektriksel Özellikleri

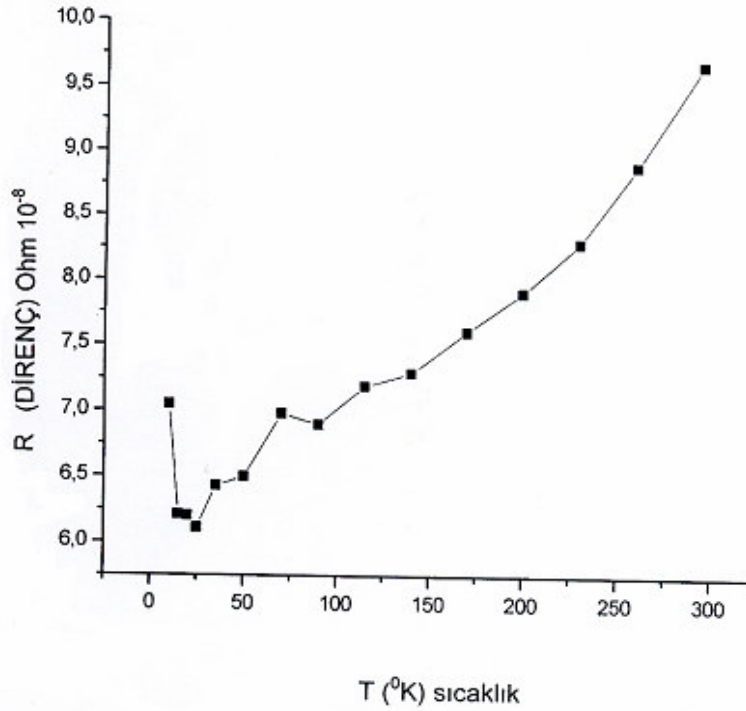
Cu-%25Mn-%11Al alaşımının zor-zorlanma davranışının yanı sıra bir de elektriksel özellikleri incelenmiştir. şekil 3.3'de orijinal alaşımın elektriksel direncinin sıcaklığın tersine bağlı değişimi verilmiştir.



**şekil 3.3.** Orijinal Cu-%25Mn-%11Al alaşımının, elektriksel direncinin sıcaklığın tersine bağlı değişimi.

Şekil 3.3'de elektriksel direnç, sıcaklığın tersi ile ters orantılı olarak değişmektedir.

Şekil 3.4'de orijinal alaşımın elektriksel direncinin sıcaklığa bağlı değişimi verilmiştir.



**Şekil 3.4.** Orijinal Cu-%25Mn-%11Al alaşımının, elektriksel direncinin sıcaklığa bağlı değişimi.

Şekil 3.3'de elektriksel direnç sıcaklığın tersi ile ters orantılı bir değişim sergilemektedir. Şekil 3.4'de elektriksel direnç sıcaklık ile lineer olarak değişmektedir. Yapılan ölçümler 10K ile 300K arasındadır. Sıcaklığın düşmesi ile dirençte azalmış, 150K civarına kadar lineer bir azalma sergilemiştir.

Alaşımın sıcaklığı yükseldiğinde, ısıı enerji atomun titreşmesine neden olmuştur. Denge halini koruyamayan atom elektronlarla etkileşmiş ve elektronların hareketini zorlaştıracı davranmıştır.

Sıcaklığın artması ile birlikte titreşen atomlar ortalama serbest yolu azaltmış ve direnci artırmıştır. Dirençteki bu artış sıcaklıkla lineer bir paralellik göstermiştir.

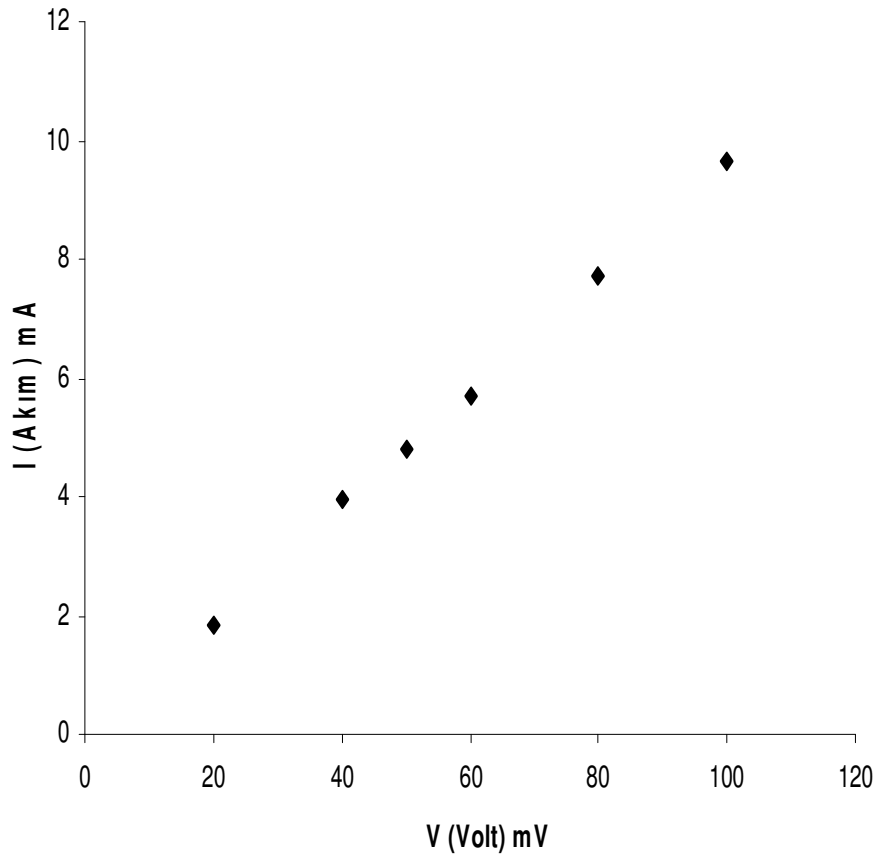
Benzer şekilde sıcaklığın düşmesi atomların titreşimini azaltarak ortalama serbest yolu uzatmıştır. Bunun bir sonucu olarak alaşımanın direnci azalmış ve bu azalma yine sıcaklıkla lineer olarak devam etmiştir.

Yapılan bir diğer elektriksel ölçümlerde ise alaşıma uygulanan ısıı işlemin ve bunun bir sonucu olarak oluşan faz yapılarının elektriksel dirence etkisi görülmüştür. Alınan gerilim ve akım değerleri Çizelge 3.3'de verilmiştir.

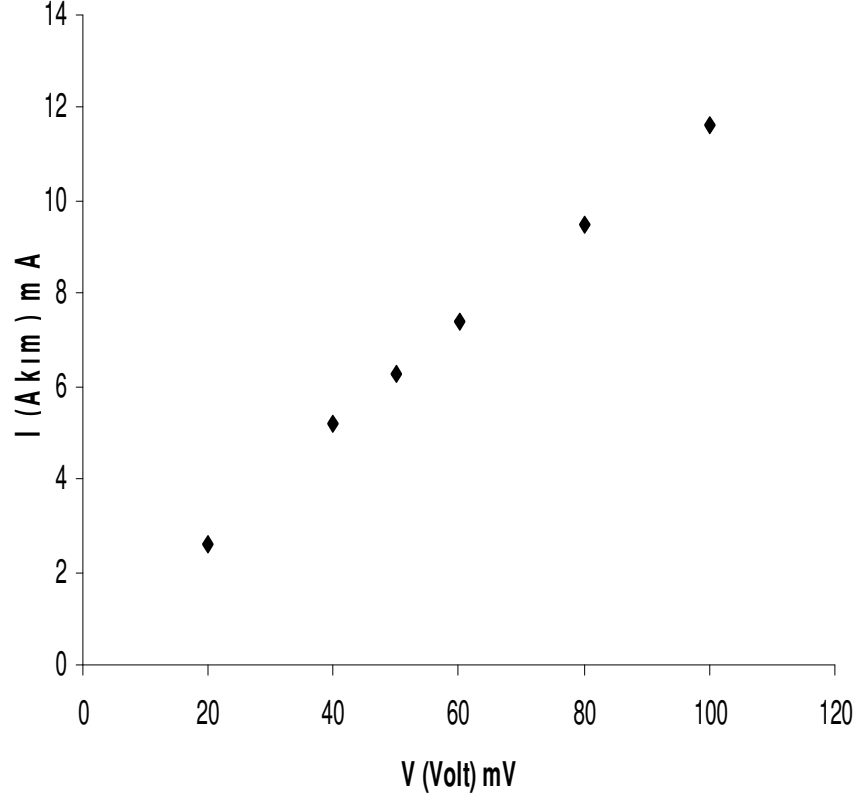
**Çizelge 3.3.** Oda sıcaklığında N1 ve N2 numunelerine ait V-I ölçüm değerleri

|   | V (mV) | I (mA) |       | R ( $\Omega$ ohm) |       |
|---|--------|--------|-------|-------------------|-------|
|   |        | N1     | N2    | N1                | N2    |
| 1 | 20     | 1.85   | 2.61  | 0.092             | 0.130 |
| 2 | 40     | 3.96   | 5.21  | 0.099             | 0.130 |
| 3 | 50     | 4.78   | 6.24  | 0.095             | 0.124 |
| 4 | 60     | 5.70   | 7.39  | 0.095             | 0.123 |
| 5 | 80     | 7.74   | 9.48  | 0.096             | 0.118 |
| 6 | 100    | 9.64   | 11.64 | 0.096             | 0.116 |

Şekil 3.5 ve Şekil 3.6'da N1 ve N2 numunesine ait, oda sıcaklığında alınan akım-gerilim değerlerine ait grafikler verilmiştir. Şekil 3.5'de oda sıcaklığında alınan 6 farklı akım ve gerilim değerleri için direnç değeri ortalama  $0.095\Omega$  'dur.



**Şekil 3.5.** N1 numunesine ait I-V karakteristiği.



**Şekil 3.6.** N2 numunesine ait I-V karakteristiği.

Şekil 3.6'da, oda sıcaklığında alınan 6 farklı gerilim ve akım değerleri için direnç değeri ortalama  $0.123\Omega$ 'dur. Deneyde alınan ölçümler Çizelge 3.3'de verilmiştir.

Şekil 3.5. ve Şekil 3.6. incelendiğinde; N1 ve N2 numunelerine ait direnç değerleri farklılık göstermektedir. N1 numunesine ait direnç değeri  $0.095\Omega$  iken N2 numunesine ait direnç değeri  $0.123\Omega$ 'dur.

Değerler karşılaştırıldığında N2 numunesinin direnci, N1 numunesinin direncine göre %30 daha fazladır. Dirençteki %30'luk bu artış çökelti fazının bir sonucudur.

#### 4. SONUÇ

Bu çalışmada; Cu-%25Mn-%11Al alaşımının; mekanik davranışları ve mekanik davranışları üzerinde ısıtma işlemlerin etkisi, elektriksel özellikleri ve elektriksel özellikleri üzerinde ısıtma işlemlerin etkisi Çizelge 3.1 'de verilen numunelerin zor-zorlanma deneyleri, elektriksel ölçüm deneyleri ve SEM çalışmaları incelendi.

Öncelikle alaşımdan alınan numuneler ısıtma işlemlere tabi tutulmuş ve ısıtma işlemler sonucu oluşan fazlar SEM ile incelenmiştir. Bununla beraber oluşan fazlar içerisindeki elementlerin ağırlıklı yüzdeleri EDS tekniği ile belirlenmiştir.

Yapılan yüzey gözlemlerinde; 60 dakika homojenleştirilen ve oda sıcaklığında ki suda soğutulan N1 numunesinin, saf austenite fazda olduğu görülmüştür. Bir diğer numune olan N2 ise, aynı ısıtma işleme maruz bırakılmış fakat fırında oda sıcaklığına kadar yavaş soğutulmuştur. Bu yavaş soğutmanın (yaşlandırma) neticesinde N2 numunesinde çökelti fazı gözlenmiştir. Isıtma işlemin ve soğutma hızının, alaşımın mekaniksel ve fiziksel özellikleri üzerinde etkili olduğu görülmüştür.

Numunelerde gözlenen austenite ve çökelti fazı; yapılan zor-zorlanma ve elektriksel direnç ölçüm deneyleri ile karşılaştırılmış ve alaşım üzerine etkileri incelenmiştir.

Her iki numuneye oda sıcaklığında dakikada 0.4 mm hızla basma zoru uygulandı. Deneye ait veriler zor-zorlanma eğrisi şeklinde Şekil 3.2.a ve Şekil 3.2.b’de verildi.

N1 ve N2 numunesine ait zor-zorlanma eğrileri incelendiğinde; N1 numunesinin akma dayanımı 750 MPa iken, N2 numunesinin akma dayanımı 980 MPa civarındadır. Değerler dikkate alındığında N2 numunesi N1 numunesine göre %23.5 kadar daha serttir. Bu sertlik çökelme sertleşmesinin bir sonucudur. Çökelme sertleşmesi N2 numunesine uygulanan yaşlandırma işleminin bir ürünüdür. Isıl işlem sıcaklığı sabit tutularak yaşlandırma süresinin değiştirilmesiyle elde edilen veriler, yaşlandırma süresindeki artışın alaşımın basma dayanımını yükseltirken zorlanma miktarını düşürdüğünü göstermiştir. Bir ana faz içinde çok küçük parçacıklar halinde çökelmiş ikinci bir faz şekil değiştirmeyi çok kısıtlar, dolayısıyla sertlik ve mukavemet artar. N2 numunesinde oluşan çökelti fazı dislokasyonun hareketini engelleyici şekilde davranmıştır ve böyle bir engelleme şekil değiştirmeye mukavemet sağlamıştır, dolayısıyla basma dayanımı ve sertlik artmıştır.

N1 numunesi N2 numunesine göre daha esnek bir yapıda kalmıştır. N2 ise gevrek bir malzeme olarak nitelendirilebilir. Şekil 3.2.b’de verilen N2 numunesine ait zor-zorlanma eğrisi incelendiğinde numunenin gevrek bir yapıda olduğu görülmektedir. Uygulanan basma zoru 980 MPa civarına geldiğinde numune esneklik göstermeden kopmuştur. N1 numunesi ise belirli bir zor altında esneklik göstermiştir.

Yapılan zor-zorlanma deneyi, saf austenite faz yapısına sahip olan N1 numunesi ile içinde çökelme fazı bulunan N2 numunesi arasında ki farkı, mekaniksel olarak ortaya koymuştur. Çökelme sertleşmesi, alaşıma %23.5 mukavemet kazandırmıştır.

Yapılan bir diğer deney ise elektriksel direnç ölçümleridir. Mekaniksel olarak incelenen numunelerin yanında, ısıtım işlemlerin etkisi ile oluşan faz yapılarının, alaşımanın elektriksel özellikleri üzerinde etkileri incelenmiştir.

Orijinal alaşıma ait farklı sıcaklıklarda alınan ölçümler Şekil 3.3 ve Şekil 3.4'de verilmiştir. Burada sıcaklığın elektriksel iletkenlik üzerinde etkisi araştırılmıştır. Ölçümler 10K-100K arasında yapılmış olup elektriksel iletkenliğin sıcaklıkla lineer olarak değiştiği gözlenmiştir.

Yüzey incelemelerinde görülen faz yapılarının elektriksel iletkenliğe etkisini görmek için, oda sıcaklığında N1 ve N2 numunesine farklı gerilimler uygulanarak numunelerin dirençleri bulunmuştur. Numunelere uygulanan farklı gerilimler ile birlikte akım ve direnç değerleri Çizelge 3.3'de verilmiş, bu değerlere ait I-V karakteristikleri ise Şekil 3.5 ve Şekil 3.6'da gösterilmiştir.

Değerler incelendiğinde saf austenite faz yapısına sahip olan N1 numunesinin direnç değeri  $0.095\Omega$  iken, içinde çökelme fazı görülen N2 numunesinin direnç değeri  $0.123\Omega$ 'dur.

Her iki direnç değeri karşılaştırıldığında, N2 numunesi N1 numunesine göre %30 daha fazla elektriksel direnç göstermiştir. Çökelti fazı numunede örgü hatasına yol açmış ve elektronların hareketliliğini azaltmıştır. Bu sonuçta zor-zorlanma davranışına benzer şekilde çökelme sertleşmesinin bir ürünüdür.

## KAYNAKLAR

1. L. Kaufman and M. Cohen, Prog. Metal Phys.,7, 165, (1958).
2. Z. Nishiyama, Martensitic Transformations, Academic Press, London, (1978).
3. M. Dikici, Katıhal Fiziğine Giriş, 19 Mayıs Üniversitesi Yayınları, Samsun, (1993).
4. T. Savaşkan, Malzeme Bilgisi ve Muayenesi, Derya Kitabevi, Trabzon, (1999).
5. W. D. Callister, Jr., Materials Science and Engineering an Introduction, 4<sup>th</sup> ed., Jhon Willey & Sons, Inc., New York, (1996).
6. F. Yılmaz, Alaşımların Yapı ve Özellikleri, Sakarya Üniversitesi Basım Evi, Adapazarı, (1996).
7. T. N. Durlu, F.Ü. Fen ve Müh. Bilimleri Dergisi, 13(1), 1, (2001).
8. M. Dikici, Fe Alaşımlarının Austenite – Martensite Dönüşümlerinde Çekirdeklenme Olayı, Y.L.T., F. Ü., Fen Bil. Enst., Elazığ, (1980).
9. J. W. Christian, The Theory of Transformations in Metals and Alloys, Pergamon Press, London, (1975).
10. S. H. Anver, Introduction to Physical Metallurgy, 2<sup>th</sup> ed., Mc-Graw – Hill Book Company, Özgün Publishing Inc., Ankara, (1984).
11. M. Erdoğan, Malzeme Bilimi ve Mühendislik Malzemeleri (Çeviri), Nobel Yayınları, (1998).
12. W. F. Smith, Structure and Properties of Engineering Alloys, 2<sup>th</sup> ed., Mc-Graw-Hill, (1993).

- 13.W. F. Smith, Foundations of Materials Science and Engineering, 2<sup>th</sup> ed., Mc-Graw-Hill, (1993).
- 14.U. Sarı, İzotropik Elastisite Teorisine Göre Faz Yüzeylerinde Bağlı Yerleştirme ve Elastik Enerji, Y.L.T., O.M.Ü., Fen Bil. Enst., Samsun, (1999).
- 15.D. A. Parter and K. E. Easterling, Phase Transformation in Metals and Alloys, Chapman Hall, London, (1981).
- 16.E. Aldırmaz, Al-40wt%Zn, Al-40wt%Zn-5wt%Pb ve Al-40wt%Zn-5wt%TI Alaşımlarında Isıl İşlemlerin Mikroyapılara Etkilerinin İncelenmesi, Y.L.T., K. Ü., Fen Bil. Enst., Kırıkkale, (2004).
- 17.M. Şentürk, Al-40wt%Zn, Al-40wt%Zn-5wt%Pb ve Al-40wt%Zn-5wt%TI Alaşımlarının Zor-Zorlanma Davranışları Üzerinde Isıl İşlem Etkilerinin İncelenmesi, Y.L.T., K. Ü., Fen Bil. Enst., Kırıkkale, (2005).
- 18.M. Kaba, Bakır Temelli Alaşımların Manyetik ve Elektriksel Özelliklerinin Ölçülmesi, Y.L.T., K. Ü., Fen Bil. Enst., Kırıkkale, (2005).
- 19.T. Shiming, L. Jinhai and Y. Shiwei, Scripta Metall. Mater., 25, 2613, (1991).
- 20.B. H. Jiang, L. Sun, R. Li and T. Y. Hsu, Scripta Metall. Mater., 33, 63, (1995).
- 21.K. K. Jee, S. H. Baik, B. J. Lee, M. C. Shin and C. S. Choi, Scripta Metall. Mater., 33, 1901, (1995).
- 22.E. El-Danaf, S. R. Kalidindi and R. D. Doherty, Metall. Mater. Trans. A, 30A, 1223, (1999).
- 23.E. Guatier, J. S. Zhang and X. M. Zhang, J. Phys., 5, 41, (1995).

24. F. Abd El-Salam, R.H. Nada and A.M. Abd El-Khalek, *Physica B* 292, 71, (2000).
25. A. Fawzy, A.S.M. Awadallah, M. Sobhy and G. Saad, *Physica B* 355, 286, (2005).
26. M.A. Crimp, K.M. Vedula, *Mater. Sci. Eng A165*, 29, (1993).