

**T.C.
ERCIYES ÜNİVERSİTESİ
BİLİMSEL ARAŞTIRMA PROJESİ**

**Al-Cu ÖTEKTİK ALAŞIMINA Ag, Sn ve Zn KATKILANMASININ VE SOĞUK
PLASTİK ŞEKİLLENDİRMENİN MEKANİK, METALURJİK VE ELEKTRİKSEL
ÖZELLİKLERE ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI**

PROJE NO: FOA-2013-4400

**Proje Yöneticisi: Doç. Dr. Fehmi NAİR
Araştırmacılar: Prof. Dr. Hasan KAYA
Prof. Dr. İsmail YILDIRIM
Prof. Dr. Necmettin MARAŞLI
Mehmet CENGİL**

**Temmuz 2014
KAYSERİ**

ONAY

Bu projenin kabulü Erciyes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyonunun
..... tarih ve sayılı kararı ile onaylanmıştır.

..... / / 2014

EÜBAP Komisyonu Başkanı

Mühür ve İmza

TEŞEKKÜR

Bu proje çalışmasının yapılabilmesi için sağladığı maddi destekten dolayı Erciyes Üniversitesi Araştırma Projeleri Birimine teşekkür ederiz.

Al-Cu ÖTEKTİK ALAŞIMINA Ag, Sn ve Zn KATKILANMASININ VE SOĞUK PLASTİK ŞEKİLLENDİRMENİN MEKANİK, METALURJİK VE ELEKTRİKSEL ÖZELLİKLERE ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

ÖZET

Bu çalışmada, ötektik Al-Cu alaşımına ağırlık % 2 (Ag, Sn ve Zn) metalleri katkılanarak elde edilen Al-ağırlık %33Cu-ağırlık %2x [x=Ag, x= Sn, x= Zn) alaşım sistemlerinin mekanik ve elektriksel özellikleri katkılama elementine göre değişimi araştırılmıştır. Bu amaçla, üçlü alaşımlar, belirtilen oranlardaki metallerin vakum ortamında eritilmesi ile hazırlandıktan sonra, eriyik haldeki sıvı alaşımların döküm fırınında grafit potalara doldurulması ile numuneler hazırlanmıştır.

Döküm fazındaki numunelerin mikroyapı fotoğrafları, optik mikroskobu ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) yardımıyla çekilmiştir. Çekilen bu fotoğraflardan katkı elementlerinin mikroyapı'ya olan etkileri araştırılmıştır. Üretilen her bir numunenin mikrosertlik (HV), çekme dayanımı (σ) ve elektriksel öz direnç (ρ) değerleri ölçülmüştür. Katkılanan elementlerin mikrosertlik, çekme dayanımı ve elektriksel öz direnç değerlerine etkisi araştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Al-Cu Ötektik, Üçlü Alaşımlar, Mikroyapı, Mikrosertlik, Çekme Gerilimi, Elektriksel İletkenlik.

**INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF COLD PLASTIC FORMING,
MECHANICAL, METALLURGICAL AND ELECTRICAL PROPERTIES OF
Ag, Sn and Zn ADDITIVE ELEMENTS ON Al-Cu EUTECTIC ALLOY**

ABSTRACT

In this study, the dependency of mechanical and electrical properties of Al-wt.33%Cu-wt.2% x [x =Ag, x =Sn, x =Zn] alloy systems, which were prepared by adding of Ag, Sn and Zn on Al-Cu eutectic alloy, on addition elements were investigated. For this purpose, after ternary alloys of metals in specified ratio prepared by means of melted in vacuum atmosphere, liquid molten alloy was filled in prepared graphite crucible in the casting furnace.

Microstructures of the casting samples were photographed by using an optical light microscopy and scanning electron microcopy (*SEM*). The microhardness (*HV*) and strain stress (σ) and electrical resistivity (ρ) of each samples have also been measured. The effects of additive elements on microhardness, tensile strength and electrical resistivity values was investigated.

Keywords: Al-Cu Eutecticalloy, Ternary Alloys, Microstructure, Microhardness, Resistivity.

İÇİNDEKİLER

ONAY	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	v
1. BÖLÜM TEMEL BİLGİLER	1
1.1. GİRİŞ	1
1.1.1. Faz Dönüşümlerinde Denge	1
1.1.2. Katılaşmada Sürücü Kuvvet.....	3
1.1.3. Aşırı Soğumalar	4
1.1.4. Katılaştırma	4
1.1.5. Doğrusal Katılaştırma	5
1.1.5.1. Saf Metallerin Katılaştırılması	7
1.1.5.2. Alaşımların Katılaştırılması	9
1.1.6. Alaşımların Ötektik Katılaştırılması	11
1.1.7. Sertlik	12
1.1.7.1. Brinell Sertlik Ölçme Yöntemi	12
1.1.7.2. Rockwell Sertlik Ölçme Yöntemi	13
1.1.7.3. Knoop Sertlik Ölçme Yöntemi.....	14
1.1.7.4. Vickers Sertlik Ölçme Yöntemi	14
1.1.8. Çekme-Dayanım Deneyi	15
1.1.9. Elektriksel Öz direnç ve İletkenlik Ölçümleri.....	17
2. BÖLÜM YÖNTEM VE DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	23
2.1. GİRİŞ	23
2.2. NUMUNELERİN HAZIRLANMASI İÇİN DENEYSEL SİSTEM.....	23
2.2.1. Vakumlu Erime Fırını	23
2.2.2. Döküm Fırını	24
2.3. Bir Deneyin Yapılışı.....	24

2.3.1. Numunenin Hazırlanması.....	24
2.3.2. Numune Potasının Yapılması.....	25
2.3.3. Alaşımın Hazırlanması.....	26
2.3.4. Dökümünün Yapılması	27
2.3.5. Metalografik İşlemler	28
2.3.6. Numunelerin Parlatılması.....	29
2.3.7. Mikroyapıların Gözlenmesi.....	30
2.3.8. Mikrosertlik Değerlerinin Ölçülmesi	30
2.3.9. Çekme-Dayanım Değerlerinin Ölçülmesi	31
2.3.10. Elektriksel Özdirenç Değerlerinin Ölçülmesi	32
 3. BÖLÜM DENEYSEL SONUÇLAR	33
3.1. Döküm Fazındaki Numunelerin Mikroyapılarının İncelenmesi	33
3.2. Fazların Kimyasal Bileşimlerinin Belirlenmesi	34
3.3 Mikrosertlik Ölçümleri.....	39
3.4 Çekme Dayanım Ölçümleri.....	42
3.5 Elektriksel Özdirenç Ölçümleri.....	42
 KAYNAKLAR.....	46

1.1. GİRİŞ

Saf metal veya eriyik kristallerin çekirdeklenme ve büyümeleri üzerinde yürütülen çalışmalar, dökümlerle elde edilen malzemelerin yapı ve özelliklerinin anlaşılmasında yeni boyutlar kazandırmıştır. Sıvı fazdan katı faza geçiş ve katı-sıvı arayüzey yapısı üzerine son elli yıldır fizikçiler, malzeme bilimcileri ve özellikle son yıllarda uygulamalı matematikçiler yoğun bir şekilde çalışmaktadırlar. Çok fazlı alaşımlar üzerinde yapılan çalışmalar güncelliğini korumakta, yeni teori ve bulgularla çalışmalar sürdürülmektedir. Özellikle ötektik, peritektik ve dendritik formda katılaşma yapısı sergileyen metalik ve kompozit malzemelerin üretimi üzerine çalışmalar hızla devam etmektedir [1-3].

Alaşım sistemlerinin kontrollü olarak doğrusal katılaştırılması, pratikte tek kristallerin büyütülmesinde, malzemelerin saflaştırılmasında (bölgesel arıtma) ve malzemede homojen bileşim elde edilmesinde kullanılmaktadır. Bu tür katılaştırmaların bazı ticari uygulamaları; yarı iletken kristallerin büyütülmesi, oksit lazer sistemleri, ısıya ve zora dayanıklı savunma sistemleri ve optik uygulamalar için kristallerin büyütülmesidir.

Katılaştırma olayında, katılaştırılan malzemenin bileşimi (C_o), sıcaklık gradyenti (G) ve katılaştırma hızı (V) birbirinden bağımsız olarak kontrol edilebilmektedir. C_o , G ve V parametreleri "*katılaştırma parametreleri*" olarak bilinir. Bu proje kapsamında hazırlanan numuneler döküm fazında ele alınıp buna bağlı olarak malzemelerin mekanik özellikleri incelenecektir.

Bu bölümde katılaştırma olayının daha iyi anlaşılabilmesi için faz dönüşümlerinde denge durumu, sürücü kuvvet, aşırı soğumalar (altsoğuma) ve çekirdeklenme olayı anlatılacaktır. Daha sonra saf metal ve alaşımların döküm fazında elde edilip mekanik özelliklerinin elde edilmesine geçilecektir.

1.1.1. Faz Dönüşümlerinde Denge

Bir sistemin dengede olması, mekanik, termal ve kimyasal olarak dengede olması demektir. Katı-sıvı arayüzeyi hareket etmediği zaman sistem mekanik olarak

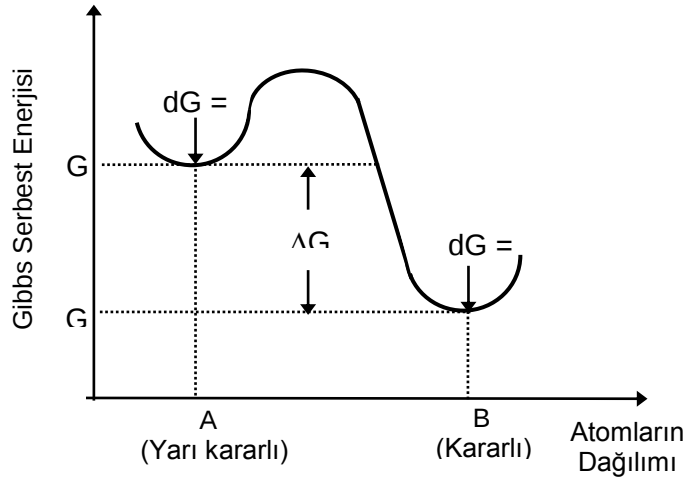
dengededir. Arayüzey sabit bir sıcaklıkta tutulduğu zaman ise termal dengededir. Kimyasal denge durumunda ise fazların kimyasal potansiyelleri eşit olmalıdır, yani kütle akışı olmamalıdır.

Sıvı fazın entropisinin büyük olmasından dolayı sıvının Gibbs serbest enerjisi katının Gibbs serbest enerjisinden daha hızlı azalmaktadır. Erime sıcaklığına (T_E) kadar katı fazın serbest enerjisi sıvı fazın serbest enerjisinden daha küçüktür. Bu yüzden katı faz kararlı denge durumundadır. T_E sıcaklığının üzerindeki sıcaklıklarda ise sıvının serbest enerjisi katının serbest enerjisinden daha küçüktür. Dolayısıyla erime sıcaklığının üstündeki sıcaklıklarda sıvı faz kararlı denge durumundadır. T_E sıcaklığında ise her iki fazın Gibbs serbest enerjileri birbirlerine eşittir. Böylece erime sıcaklığında katı ve sıvı faz birlikte dengede bulunurlar.

Klasik termodinamiğe göre sabit basınç ve sıcaklıkta bulunan yalıtılmış bir sistemin Gibbs serbest enerjisi minimum değerinde ise bu sistemin dengede olduğu söylenir. Yani yalıtılmış bir sistemin denge durumu için Gibbs serbest enerjisi matematiksel olarak,

$$(dG)_{T,P} = 0 \quad (1.1)$$

şeklinde ifade edilir. Şekil 1.1’de atomların dağılımına göre Gibbs serbest enerjileri verilmektedir.



Şekil 1.1. Atomların dağılımına göre Gibbs serbest enerjisinin değişimi [1].

Şekil 1.1’deki B durumunda sistemin Gibbs serbest enerjisi mümkün olabilecek en küçük değere sahip olduğundan sistem *kararlı denge* durumundadır denir. A durumunda da Gibbs serbest enerjisindeki değişim sıfırdır fakat mümkün olabilecek minimum değerden büyüktür. Bu durumu kararlı denge durumundan ayırt etmek için A noktasına

yarı kararlı denge durumu denir. Kararlı denge durumu ile yarı kararlı denge durumu arasındaki geçiş durumlarına ise *kararsız denge* durumları denir [1].

1.1.2. Katılaşmada Sürücü Kuvvet

Bir sıvı erime sıcaklığının altındaki bir sıcaklığa kadar soğutulursa Gibbs serbest enerjisinde $G = G_l - G_s$ kadar değişme olacaktır (Şekil 1.1). Gibbs serbest enerjisindeki bu azalma katılaşma için gerekli olan sürücü kuvveti sağlar [1]. Katılaşma için gerekli olan serbest enerji değişim miktarı aşağıdaki şekilde elde edilebilir;

Sabit basınçta ΔT sıcaklık aralığında katı ve sıvı fazlar için Gibbs serbest enerjilerinin sıcaklıkla değişiminin lineer olduğu kabul edilir. Böylece Gibbs serbest enerjileri,

$$G_k = H_k - T S_k \text{ ve } G_s = H_s - T S_s \quad (1.2)$$

olur. Bu durumda,

$$\Delta G = G_k - G_s = H_k - H_s - T(S_k - S_s) = \Delta H - T\Delta S \quad (1.3)$$

şeklinde elde edilir. Burada k ve s indisleri sırasıyla katı ve sıvı fazları göstermektedir. Saf bir maddenin faz dönüşüm sıcaklığında (yani T_E 'de), $G_k = G_s$ olacağından $\Delta G = 0$ olur. Buna göre denklem (1.3)'den,

$$\Delta S = \frac{\Delta H}{T_E} \quad (1.4)$$

yazılabilir. Burada ΔS erime entropisidir. Sonuç olarak herhangi bir T sıcaklığında Gibbs serbest enerjisindeki değişim (1.3) ve (1.4) denklemlerinden,

$$\Delta G \cong \Delta H - \frac{\Delta H T}{T_E} = \frac{\Delta H (T_E - T)}{T_E} = \frac{\Delta H \Delta T}{T_E} = \Delta T \Delta S \quad (1.5)$$

olarak elde edilir. Denklem (1.5)'e sıvı fazdan katı faza dönüşüm için hacimsel serbest enerji değişimi veya *sürücü kuvvet* denir [1]. Saf maddeler için erime sıcaklığındaki entalpi değişimi erime gizli ısısına eşittir, yani $\Delta H = L$ dir.

1.1.3. Aşırı Soğumalar

Sıvıdan katıya dönüşüm için, bir metalin sıcaklığı dengedeki erime sıcaklığı (T_m)'nin altındaki herhangi bir T sıcaklığına kadar indirmek gerekir. Bu esnada sistemin toplam aşırı soğuması ΔT ile gösterilir ve ifade olarak

$$\Delta T = T_m - T \quad (1.6)$$

yazmak mümkündür. Alaşımlarda ΔT 'nin değeri arayüzey eğriliğine, sıvının bileşimine ve sıvıdan katıya geçen atomların enerji engeline bağlıdır. Yani ΔT bu etkilerden gelen aşırı soğumaların toplamına eşittir. İfade olarak yazarsak,

$$\Delta T = T_m - T = \Delta T_s + \Delta T_c + \Delta T_k \quad (1.7)$$

Burada; ΔT_s sıvıdaki çözünen yayınımdan ileri gelen aşırı soğuma, ΔT_c sıvı-katı arayüzeyinin eğriliğinden ileri gelen aşırı soğuma ve ΔT_k kinetik aşırı soğumadır. Bu aşırı soğumaları şimdi sırayla görelim.

1.1.4. Katılaştırma

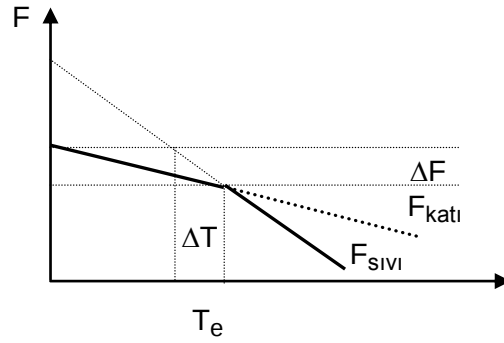
Bir fazın başka bir faza göre kararlı olup olmadığı mol başına düşen serbest enerji ile belirlenir ve bu serbest enerji Helmholtz serbest enerjisi olarak ifade edilir.

$$F = E - TS \quad (1.8)$$

Burada E , fazın iç enerjisidir. Enerjinin miktarına göre atomlar faz değiştirebilirler. Atomlar arasındaki kohesif (yapııcı) kuvvetler büyüktür ve iç enerji negatiftir. Denklem (1.8)' de ikinci terim sıcaklık (T) ve entropidir (S). Entropi tanım olarak herhangi bir fazdaki atomların sıralanmasındaki düzensizlik ölçüsüdür. Katı bir kristalde atomların termal titreşimlerinden dolayı entropi artışı gösterir. Sıvıda ise yapısal

düzensizlik ve termal titreşimin her ikisinden dolayı entropi yüksek olup düzensiz atomik yapı oluşmaktadır.

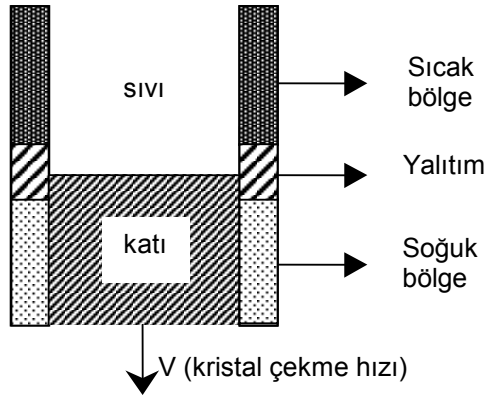
Şekil 1.2' de sıcaklık ile bir metalin katı ve sıvı fazlarının serbest enerjilerinin değişimi şematik olarak gösterilmektedir. $T=0\text{ K}$ ' de $F=E$ ve katı atomlar arası kohezyon kuvveti büyük olduğundan dolayı iç enerji küçük olup, bu nedenden dolayı serbest enerjide küçük olacaktır. Sıcaklık artışıyla TS terimi nispeten önemli olmaya başlar ve $S>0$ olduğundan dolayı serbest enerji azalır. Ancak sıvının entropisi katının entropisinden daha büyüktür ve sıvı fazın serbest enerjisindeki azalış artan sıcaklıkla katı fazınkinden daha hızlıdır. Bu nedenden dolayı iki fazın serbest enerji eğrileri denge erime sıcaklığında kesişir. Yüksek sıcaklıklarda ise katı faz, sıvı fazdan daha düşük enerjiye sahip olduğundan katı faz kararlı durumdadır. Eğer sistem dengede ise, sıvı ve katının serbest enerjileri birbirine eşittir [8].



Şekil 1.2. Katı ve sıvı fazların serbest enerjilerinin sıcaklıkla değişimi [7].

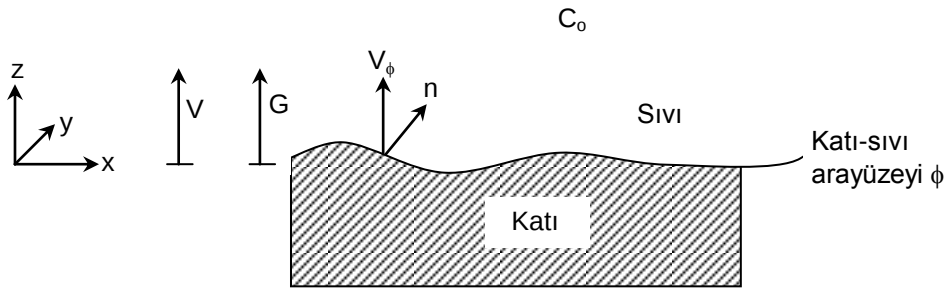
1.1.5. Doğrusal Katılaştırma

Bir alaşımın doğrusal katılaştırılmasında, numune sabit sıcaklıktaki sıcak ve soğuk bölgelerle temasa maruz kalarak oluşan sabit sıcaklık gradyentinde yerleştirilir (Şekil 1.3). Numune, sabit hızla soğuk bölgeye çekilerek yada termal düzeneğin hareketi ile katılaştırılır. Katılaştırılan malzemenin özelliklerini etkileyen mikroyapı parametrelerinin kontrolü, doğrusal katılaştırma yönteminde mümkündür[9]. Bu nedenle doğrusal katılaştırma teknolojisinde önemli bir yere sahiptir. Şimdi ikili alaşımların doğrusal katılaştırılmasındaki temel bağıntıları ve bu bağıntılar elde edilirken yapılan kabulleri inceleyelim.



Şekil 1.3. Doğrusal katılaştırma [9].

Katı ve eriyik, katılaşmanın gerçekleştiği katı-sıvı arayüzeyi ile ayrılır (Şekil 1.4). Bu durumda, katı ve sıvı fazı için çözünme ve ısı korunumu denklemlerinin ve faz sınırı için yüzey dengesinin ve katılaştırma yüzeyinin ilerleme şeklinin tanımlanması gerekmektedir. Bu tanımlar yapılırken arayüzeyin matematiksel olarak keskin, katı ve sıvı fazlarının eşit yoğunlukta olduğu, katı içerisinde çözünme difüzyonunun ihmal edildiği ve arayüzeyde sıcaklığın sürekli olduğu kabulleri yapılır. Ayrıca tüm fiziko kimyasal katsayıların sabit nicelik olduğu ve katıdaki elastik ve plastik etkilerin ihmal edilebilir derecede olduğu varsayılır. Daha etkili varsayım ise, gerçek deneysel ortamlarda uygulanabilirliği kısıtlı olan, sıvı fazda konveksiyonun olmadığı kabulüdür.



Şekil 1.4. V hızı G sıcaklık gradyentine maruz kalan başlangıç C₀ çözünen konsantrasyon- undaki eriyiğin doğrusal katılaştırma şekli [9].

Sabit V hızı ile ilerleyen katılaştırma yüzeyine ilişkin referans sisteminde korunum denklemleri şöyledir;

(a) Katı (k) ve sıvı (s) fazında ısı dengesi:

$$\frac{\partial T_i}{\partial t} = D_{th}^i \nabla^2 T_i + V \frac{\partial T_i}{\partial z}, \quad (1.9)$$

burada $i=k$ yada s olabilir, T_i ve D_{th}^i sırasıyla i fazındaki sıcaklık ve difüzyon gücüdür.

(b) Sıvıdaki çözünen dengesi:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \nabla^2 C + V \frac{\partial C}{\partial z}, \quad (1.10)$$

burada C ve D sıvıdaki çözünen konsantrasyonu ve difüzyon sabitidir.

(c) Arayüzeyde termal akı dengesi:

Katılaştırma yüzeyinde; ısı korunum denklemi, sıvı ve katıdaki normal sıcaklık gradyentleri ile bölgesel erime gizli ısının oluşumu ile ilgilidir;

$$\left[K_k \vec{\nabla} T_k - K_s \vec{\nabla} T_s \right]_{\phi} \cdot \hat{n} = L \vec{V}_{\phi} \hat{n}, \quad (1.11)$$

burada L birim hacimdeki erime gizli ısı, $\vec{V}_{\phi}$ ve $\hat{n}$ faz sınırından sıvıya yönelmiş büyüme hızı ve yüzey normali, K_k ve K_s ise sırasıyla katı ve sıvının termal iletkenliğidir. İlgili niceliklerin katılaştırma yüzeyinde değerlendirilmesi gerektiğinden ϕ indisi kullanılmıştır.

(d) Arayüzeyde çözünen akı dengesi:

Çözünen korunumu, katılaştırmada eriyiğe serbest bırakılan çözünen ($k < 1$) yada çözücü ($k > 1$) difüzyonla sıvıya taşınmasını gerektirir,

$$[C_k - C]_{\phi} \vec{V}_{\phi} \cdot \hat{n} = D [\vec{\nabla} C]_{\phi} \cdot \hat{n}, \quad (1.12)$$

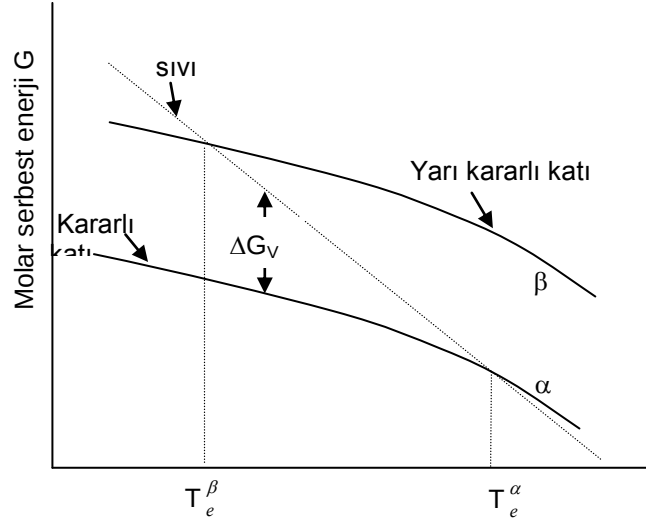
burada C_k katıdaki çözünen konsantrasyonudur.

1.1.5.1. Saf Metallerin Katılaştırılması

İlk olarak dengedeki saf metali ele alalım. Bir saf metalin sıvı-katı fazlarının sıcaklık ile serbest enerji değişimleri Şekil 1.5’ de gösterilmektedir. Düşük serbest enerjiye sahip fazda belirli sıcaklık bölgesinde (katının sıcaklığı $< T_e$ ve sıvının sıcaklığı $> T_e$) katı ve sıvı faz bir arada dengede ise serbest enerjileri eşit olup bu iki fazın sıcaklıkları dengesel erime sıcaklığı (T_e)’ dir. Bu dengesel erime sıcaklığı (T_e)’ nin basınca göre değişimini veren bağıntıya “Clapeyron eşitliği” adı verilir.

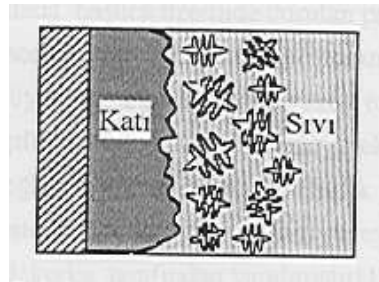
$$\frac{\Delta T_e}{\Delta P} = T_e \frac{\Delta V}{\Delta H} \quad (1.13)$$

Burada, ΔP basınçtaki değişimi, ΔH , entalpideki değişimi, ΔT_e , basınç değişiminden ileri gelen sıcaklık değişimi, ΔV ise, sıvı ve katı fazları arasındaki molar hacim farkıdır [10]. Eriyik metalin çok yavaş soğutulması durumunda, bütün metalde sıcaklık üniform şeklinde ise, katılaşma bölgesinin tam ortasındaki bir noktada katılaşma başlar ve çekirdekler sıvı içine dağılır. Her bir çekirdek tercihlili bütün yönlerde büyüyerek irileşir ve sonuçta eşeksenli dendritik tane yapısını oluşturur.



Şekil 1.5. Saf metalin sıvı-katı fazlarının sıcaklık ile serbest enerji değişimleri[4].

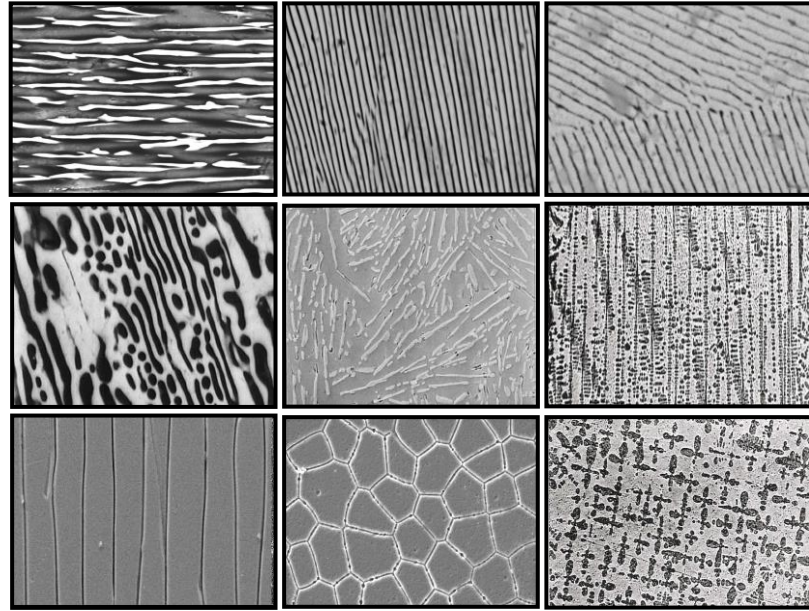
Eğer sıvı tamamen üniform şeklinde hızlı bir şekilde soğutulursa, aşırı soğuma büyük olacak ve eriyikte çok daha fazla çekirdek oluşacaktır. Şekil 1.6' de bu durumdaki eşeksenli dendritik tane yapısı şematik olarak gösterilmiştir. Saf metallerin katılaştırılmasında olduğu gibi değişik bileşimdeki alaşım sistemlerinde doğrusal olarak katılaştırılabilmektedir.



Şekil 1.6. Eş eksenli dendritik tane yapısı

1.1.5.2. Alaşımların katılaştırılması

Metaller ve metalik alaşımlar daha fazla işlenebilirlik (ısıl işlem, haddelenme, dövülme vs.) iyi ısıl ve elektriksel iletim özelliğine sahiptir. Mühendislik uygulamalarında en çok kullanılan ve üzerinde durulan malzemeler alaşım sistemleridir. Malzemelerin mikroyapılarındaki değişiklikler (tanecik büyüklüklerinin) malzemenin fiziksel özelliklerini (başta mikrosertlik özelliklerini, H_V) ve diğer özelliklerini etkilediği bilinmektedir. Malzemenin mikroyapı parametreleri (λ_E , λ_1 , λ_2 , R ve d) bu malzemelerin katılaştırılması esnasındaki katılaştırma parametrelerine yani sıcaklık gradyenti G , katılaştırma hızı V ve alaşımların bileşimi C_o 'a bağlıdır. Katılaştırma parametreleri G , V ve C_o birbirinden bağımsız kontrol edilerek malzemelerin tanecik boyutundaki mikroyapılarına ve mekanik özelliklerine (mikrosertlik) etki etmek kontrollü (doğrusal) katılaştırma yöntemi ile mümkündür. Bu yöntem ile değişik malzemelerden elde edilen farklı mikroyapı şekilleri Şekil 1.7'de verilmiştir.

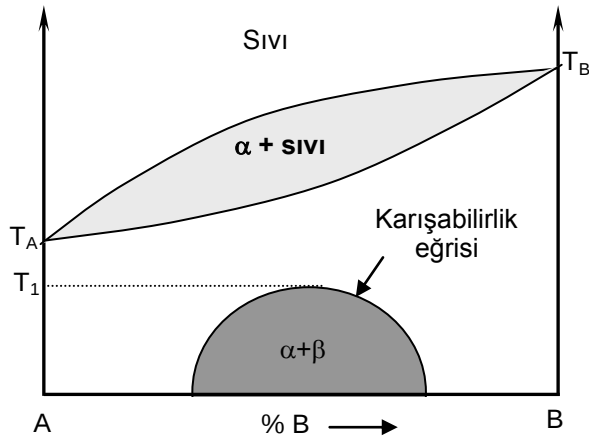


Şekil 1.7. Değişik malzemelerde gözlenen mikroyapılar

Bir alaşım sistemi, iki veya daha fazla elementin belirli bir sıcaklık, basınç ve bileşimde eritilmesiyle elde edilen yeni bir katı çözüldür. Alaşımlar, alaşım tipine bağlı olarak kendisini oluşturan elementlerin özelliklerini taşıyabileceği gibi, bu elementlerin özelliklerinden başka yeni özellikler de taşıyabilirler. Örneğin saf bir metale alaşım elementi ilave edilerek, onun mekanik özellikleri büyük ölçüde geliştirilebilmektedir [5]. Alaşımlar, kendisini oluşturan elementlerin birbiri içerisindeki karışımına göre tek

fazlı ve çok fazlı olmak üzere ikiye ayrılırlar. Heterojen bir sistemin fiziksel sınırlarla ayrılmış olan kısmına *faz* denir. Birbiri içerisinde her oranda homojen olarak karışabilen alaşımlar, tek fazlı alaşımlardır. Böyle bir alaşım sistemindeki, alaşım elementlerinin örgü sistemlerinde bir değişiklik olur ve alaşım elementinden birinin atomları diğerinin kristal örgüsüne yerleşir. Yeni örgüde farklı özelliklere sahip atomların bulunmasından dolayı farklılıklar oluşur ve yeni bir malzeme ortaya çıkar. Çok fazlı alaşımlarda, alaşımı oluşturan elementlerin baskın özellikleri görülür ve örgü yapılarında bir değişiklik olmaz [6,7].

Endüstride kullanılan metalik sistemler, yüksek sıcaklıklarda birbirini her oranda eritebilmelerine rağmen, düşük sıcaklıklarda sınırlı oranda eritebilmektedirler. Şekil 1.8’de ikili bir alaşım sistemine ait faz diyagramı verilmektedir. Faz diyagramından da görüldüğü gibi alaşım sistemi, sıvı halden soğutulmaya başlatıldığında, önce katı çökelti oluşmasıyla α fazı meydana gelmektedir. Daha sonra sıcaklık T_1 ’e düşürüldüğünde α fazı B atomlarınca zenginleşmekte ve bu sıcaklığın altında B atomlarının fazlası β fazı şeklinde çökerek, α ve β fazlarını oluşturmaktadır.

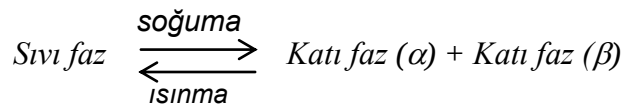


Şekil 1.8. Birbirini sınırlı oranda eriten ikili sistemlerde denge faz diyagramı [7]

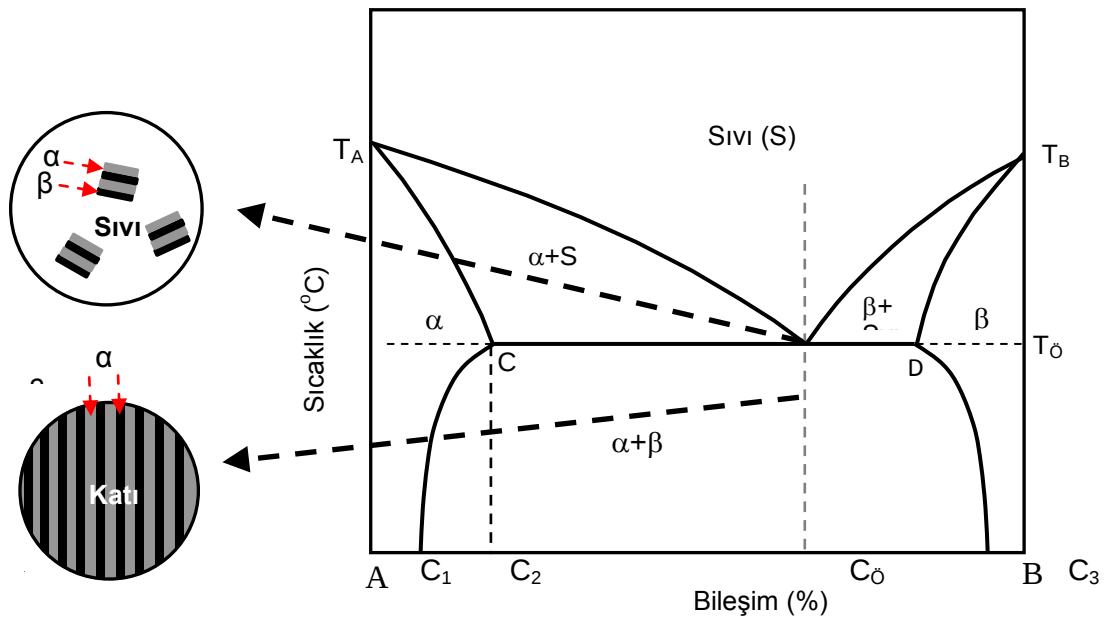
Katılaştırma yapılarına göre alaşımların (organik, metalik, komposit vs.) katılaşmasını (a) Düzlemsel cephede katılaştırma (b) Hücresel katılaştırma (c) Dendritik katılaştırma üç kısımda inceleyebiliriz. Ancak malzemenin fazına ve bileşimine bağlı olarak ötektik ve peritektik katılaştırma yapıları da oluşmaktadır.

1.1.6. Alaşımların Ötektik Katılaştırılması

“Ötektik” kelimesi, Yunancada kolay eriyen anlamına gelmektedir. Ötektik bölge, bir alaşım sisteminde α , β ve γ gibi katı fazlar ile sıvı fazın dengede olduğu üçlü bölgedir. Şekil 1.20’deki ikili faz diyagramında ötektik bölge gösterilmektedir. Bu noktalardaki sıcaklığa *ötektik sıcaklık*, bileşime de *ötektik bileşim* denir. Ötektik alaşımı oluşturan iki bileşenli sistemlerde, bileşenler birbirinin erime sıcaklıklarını düşürür ve ötektik reaksiyon sonucu sıvı faz aynı anda iki farklı katı faza dönüşür. Dolayısıyla ötektik reaksiyon,



şeklinde ifade edilir [7]. Bu tür reaksiyona sahip sistemlerde *ötektik sistemler* denir. Bu reaksiyon esnasında iki katı faz yan yana gelerek şekillenir ve ötektik yapı oluşur [11]. Ötektik yapının oluşumu, katılaşma hızı, sıcaklık gradyenti ve alaşımın bileşimine göre değişim gösterir. Şekil 1.9’de iki bileşenli bir ötektik sisteme ait faz diyagramı ve katılaşma yapısı görülmektedir.



Şekil 1.9. İki bileşenli ötektik sisteme ait faz diyagramı ve mikroyapı oluşumu [11]

Şekil 1.9’da verilen faz diyagramındaki sembollerden C_O ; ötektik bileşim, T_O ; ötektik sıcaklık, T_A ve T_B ; A ve B bileşenlerin saf haldeki erime sıcaklıkları, C_1 ; oda sıcaklığında B metalinin α fazındaki erime sınırı, C_2 ; B metalinin α fazındaki en yüksek erime sınırı, C_3 ; A metalinin β fazındaki en yüksek erime sınırı anlamına gelmektedir. Faz diyagramında gösterilen C_E ötektik bileşimindeki alaşım sistemi, sıvı halden soğuyarak, T_E ötektik sıcaklığa geldiğinde, ötektik reaksiyon sonucu α ve β fazları oluşur. Bu dönüşüm sırasında α ve β kristalleri yan yana, sık ve ince tabakalar halinde büyür ve katılaştırma şartlarına bağlı olarak ötektik yapı oluşur.

1.1.7. Sertlik

Malzemelerin sertliğinin ölçülmesi endüstride büyük önem taşır. Sertlik, dayanım ve aşınma direncine bağlı bir özelliktir. Bir malzemenin yüzeyine batırılan bir cisme, malzemenin gösterdiği dirence o malzemenin *sertliği* veya *mikrosertliği* denir.

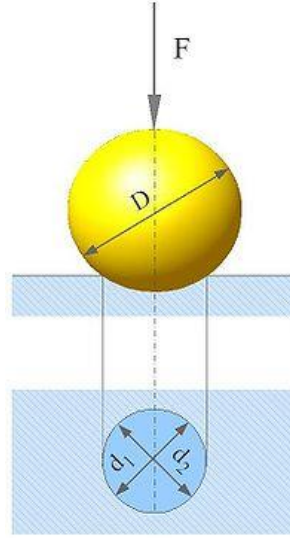
Bir malzeme ne kadar sert ise dayanımı o kadar yüksek ve aşınma direnci o kadar fazladır. Makine elemanlarında kullanılan malzemelerin ömrü, sertlikleriyle yakından ilişkilidir. Ayrıca, sert malzemelerin içyapıları düzensiz ve stresli olduğundan, elektriksel iletkenlikleri de düşüktür. Bu bakımdan malzemelerin sertlikleri ile elektriksel iletkenlikleri arasında yakın bir ilişki vardır. Günümüzde yaygın olarak kullanılan dört çeşit sertlik ölçme yöntemi vardır [13]. Bunlar,

- (a) Brinell sertlik ölçme yöntemi,
- (b) Rockwell sertlik ölçme yöntemi,
- (c) Knoop sertlik ölçme yöntemi,
- (d) Vickers sertlik ölçme yöntemidir.

1.1.7.1. Brinell sertlik ölçme yöntemi

Bu yöntemde batıcı uç olarak sertleştirilmiş çelik küre veya tungsten karbür kullanılmaktadır. Kullanılacak kürenin çapı numune kalınlığına ve malzemenin şekline göre seçilir. Yükün uygulanma süresi 10-15 saniyedir. Sertliği ölçülecek numune üzerine batırılan çelik küre, hacmi nedeni ile numune üzerine küresel iz bırakır. Şekil 1.10’de Brinell sertlik ölçüm metodunun şematik gösterimi verilmiştir.

Şekil 1.10. Brinell sertlik ölçüm metodunun şematik gösterimi.



Numune üzerindeki izin alanı hesaplanarak, Brinell sertlik (H_B) değeri;

$$H_B = \frac{\text{Uygulanan yük (kgf)}}{\text{İz yüzeyi (mm}^2\text{)}} \quad (1.14)$$

$$H_B = \frac{2F}{\pi D (D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (\text{kgf / mm}^2) \quad (1.15)$$

bağıntısı ile bulunur [19]. Burada F ; numuneye uygulanan yük, D ; baskı küresinin yarıçapı, d ; numune üzerinde oluşan izin çapıdır.

1.1.7.2. Rockwell sertlik ölçme yöntemi

Rockwell sertlik ölçme yönteminde, *standart cihaz* ve *yüzeysel cihaz* olmak üzere iki tip sertlik ölçme cihazı kullanılmaktadır. Standart cihazda, 60, 100, 150 kg'lık kütleler kullanılır. Batıcı uç olarak, sert malzemeler için uç kısmında tepe açısı 120° olan, 0.2 mm çapında yuvarlaklaştırılmış elmas koni kullanılırken, yumuşak malzemeler içinde 1/16" (~1.59 mm) çapında sertleştirilmiş çelik bilye kullanılmaktadır. Yüzeysel cihazlar çok ince ve yumuşak malzemeler için kullanılmakla beraber, sertlik ölçümünde 15, 30, 45 g'lık kütleler kullanılır. Uç olarak standart cihazlarda kullanılan çelik bilyeler ve elmas koni yüzeysel cihazlarda da kullanılmaktadır. Rockwell yönteminde sertlik, numuneye batan ucun meydana getirdiği derinlik esas alınarak bulunmaktadır.

Sertlik ölçme cihazının hassasiyeti kontrol edildikten sonra sertliğini ölçmek istediğimiz malzemeye uygun ağırlık ve uç seçilir. Uç, malzemeye önce 10 kg'lık bir kütle ile yük uygulanır. Ön yükleme ile öncelikle malzemeye temas sağlanır. Böylelikle sertlik ölçümünde ön yükleme ile bir başlangıç noktası tespit edilmiş olur. 10 kg'lık yüklemekten sonra cihazın ibresi sıfıra ayarlanarak kalan ağırlıklar yüklenir. Bu durumda ucun, sertliği ölçülen numuneye batması beklenir. Bir süre sonra son yüklenen ağırlık kaldırılarak sertlik değeri göstergeden okunur. Sertlik ölçümünde uç, numuneye ne kadar derin batarsa numunenin o kadar yumuşak olduğu anlamına gelir [13].

1.1.7.3. Knoop sertlik ölçme yöntemi

Mekaniksel sertlik ölçme yöntemlerinden biri olan Knoop sertlik ölçme yöntemi, özellikle çok ince ve kırılgan malzemelerin mikrosertlik değerlerinin ölçülmesinde kullanılır. Bu yöntemde amaç, sertliği ölçülecek numune üzerinde sadece küçük bir iz bırakılmasıdır. Bir piramit elmas uç, belirli bir kuvvet ve süre kadar uygulanır. Sonuçta numune üzerinde ancak mikroskopla okunabilecek bir iz oluşur. Knoop sertliği H_K veya KHN ile gösterilir ve aşağıdaki formülle ifade edilir;

$$H_K = \frac{\text{Uygulanan Yük}}{\text{İz Alanı}} = \frac{P}{C_p L^2} \quad (kgf / mm^2) \quad (1.16)$$

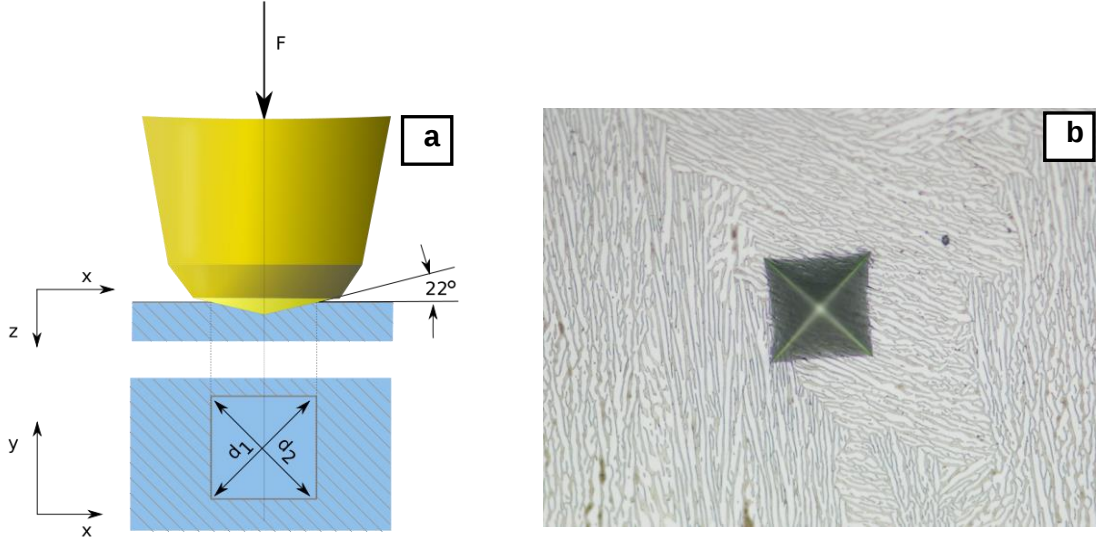
Burada L ; numune üzerindeki izin eksenel uzunluğu, C_p ; düzeltme faktörü (izin şekline bağlıdır ve genellikle 0.070279 değeri kullanılır) ve P ; uygulanan yük miktarıdır.

H_K genellikle 100'den 1000'e kadar değişen sertlik değerlerini alır. Bu metotla çok küçük boyutlu malzemelerin bile mikrosertlik değerleri ölçülebilmektedir. Bununla beraber numune üzerinde oluşturulan izin boyutu ölçülürken mikroskobun kullanılmasının zor olması, numuneyi hazırlama ve iz uygulama işlemlerinin zaman alması bu metodun zorluklarındandır [13].

1.1.7.4. Vickers sertlik ölçme yöntemi

Vickers sertlik ölçümünde kullanılan uç, yüzeyleri arasında 136° açı bulunan bir elmas piramittir. Darbelere karşı daha hassas olduğundan en sert malzemeler bile bu metotla ölçülebilir. Uygulanan yük 10 g ile 1000 g arasında değişmektedir. Uç, numuneye belli

bir kuvveti 5-30 saniye kadar uygulayarak, numune üzerinde kare şeklinde iz oluşturur. İzin köşegen boyutları (d), cihaz mikroskobundan okunarak belirlenir. Şekil 1.11’de Vickers sertlik ölçüm metodunun şematik gösterimi ve batıcı ucun numune yüzeyinde bıraktığı izin fotoğrafı verilmiştir.



Şekil 1.11. (a) Vickers sertlik ölçüm metodunun şematik gösterimi, (b) Batıcı ucun numune yüzeyinde bıraktığı izin fotoğrafı

Vickers sertliği (H_V), Brinell sertliğine benzer şekilde, uygulanan kuvvetin iz alanına bölünmesi ile belirlenir.

$$H_V = \frac{2F \sin(\theta / 2)}{g \cdot d^2} \quad (\text{kgf} / \text{mm}^2) \quad (1.17)$$

Burada, F ; uygulanan yük, g ; yer çekim ivmesi, d ($d^2 = d_1 \cdot d_2$); izin alanıdır. Vickers sertliği ile çok ince bölge veya tabakaların bile sertliği hassas bir şekilde ölçülebildiğinden, bu metotla ölçülen sertlik değerleri, mikrosertlik olarak da bilinir [12].

1.1.8. Çekme Deneyi

Çekme deneyi, malzemelerin statik yük altındaki mekanik özelliklerini belirlemek ve malzemelerin özelliklerine göre sınıflandırılmasını sağlamak amacıyla uygulanan, mühendislik açısından çok önemli bir mekanik deneydir. Deney, mekanik özellikleri

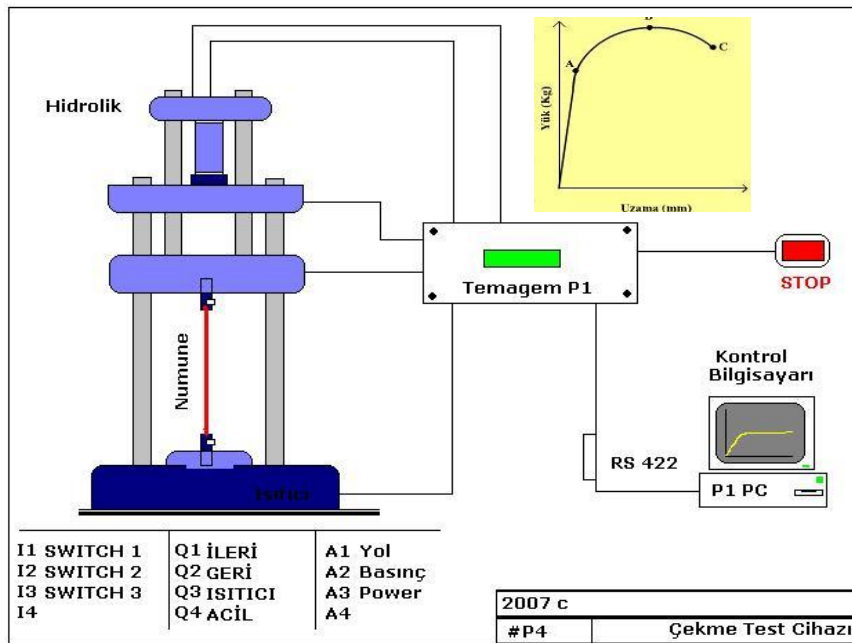
belirlemek amacıyla bir deney parçasının, genellikle kopuncaya kadar, gerilmesini kapsar. Belirlenecek mekanik özellikler:

- a) Elastisite katsayısı
- b) Elastiklik sınırı
- c) Rezilyans
- d) Akma gerilmesi
- e) Çekme dayanımı (Maksimum gerilme)
- f) Uzama (%)
- g) Kesit daralması (%)

Elastisite katsayısı (E): Gerilme (σ) ile birim şekil değişimi (ϵ) arasındaki ilişkiyi belirleyen malzemenin temel özelliği olan sabit.

$$\sigma = E\epsilon$$

Elastiklik sınırı: Elastik şekil değişiminin görüldüğü en yüksek gerilme değerine denir. Rezilyans (u_r): Elastik şekil değişimi esnasında numunenin depoladığı enerji anlamına gelir. Bu enerji, gerilme-birim şekil değişimi eğrisinin altında kalan alana eşittir. Deney numunenin kırılması ile sonuçlanırsa bu enerji geri verilir. Çekme deneyine tabi tutulan numunenin yukarıda belirtilen özelliklerin sıhhatli bir şekilde ortaya çıkarılabilmesi için, alındığı malzemeyi tam olarak temsil edebilmesi gerekir.



Şekil 1.12. Çekme deneyi düzeneği

1.1.9. Elektriksel Özdirenç ve İletkenlik Ölçümleri

Elektriksel yüklerin herhangi bir etki ile bir yönde veya her iki yöndeki hareketi elektriksel iletkenlik olarak tanımlanır. Elektriksel iletkenlik hareketli taneciklere göre sınıflandırılır. Bu sınıflandırmada hareketli tanecikler elektronlar ise elektronik iletkenlik, iyonlar ise iyonik iletkenlik, her iki tanecik türününse hareketli olduğu iletkenlik türü karma iletkenlik olarak tanımlanmıştır. Bu durumda iletkenlik üçe ayrılır ve Tablo 1.1’de verilen şekilde gruplandırılır;

Tablo 1.1. Elektriksel iletkenliğin sınıflandırılması.

Elektriksel İletkenlik		
Elektronik İletkenlik	İyonik İletkenlik	Karma İletkenlik
Metalik İletkenlik (Au, Cu gibi)	Katı Elektrolitler (Zirkonyum tabanlı katı elektrolit gibi)	(δ -Bi ₂ O ₃ Fazı)
Yarıiletkenlik (Si, Ge, Polimer gibi)	Süper İyonik İletkenlik (SrF ₂)	
Süper İletkenlik (Hg, Al, MgB ₂ gibi)	Hızlı İyon İletkenliği (Tl ₃ Cu ₂ Cl ₅)	

Bir malzemenin elektrik iletimi iyonik ya da elektronik mekanizmalardan biri ile olur [14]. İyonik ve elektronik iletkenliğe sahip malzemelerin iletkenlik aralıkları Tablo 1.2’de verilmiştir. Yarıiletkenlik, süperiletkenlik ve metalik iletkenliği içine alan elektronik iletkenliğin dışında diğer bir iletkenlik türü iyonların hareketine bağlı olan iyonik iletkenliktir. İyonik iletkenlik özellikle O⁻², N⁻³, Cl⁻, B⁻² gibi anyonlar veya H⁺, Na⁺, Li⁺ gibi katyonların hareketleri ile görülür [20]. İyonların (katyon veya anyon) kristal örgüde hareket etmeleri (göç etmeleri) ile gerçekleşen iletkenliğe *iyonik iletkenlik*, bu tür iletkenliğe sahip katılarda ise *katı elektrolit* denir.

Yalnızca yüksek sıcaklıkta atomların termal enerjilerinin yüksek olduğu ve örgü kusuru konsantrasyonunun çok yüksek sayılara ulaştığı yerlerde bu tür iletkenlik fark edilebilir. NaCl, MgO gibi çoğu kristal malzemeler düşük iyonik iletkenliğe sahiptir. Çünkü atomlar termal titreşimlerine rağmen örgü noktalarından ayrılamazlar. Bunun tersi olarak, çoğu katı elektrolit malzemeler yüksek iyonik iletkenliğinden dolayı hızlı iyonik elektrolit ya da süper iyonik elektrolit olarak sınıflandırılırlar.

Tablo 1.2. Malzemelerin elektriksel iletkenlik değeri aralıkları.

Malzeme		İletkenlik ($\Omega \text{ cm}$) ⁻¹
İyonik İletkenlikler	İyonik Kristaller	$< 10^{-16} - 10^{-2}$
	Katı Elektrolitler	$10^{-1} - 10^3$
	Sıvı Elektrolitler	$10^{-1} - 10^3$
Elektronik İletkenlikler	Metaller	$10^3 - 10^7$
	Yarıiletkenler	$10^{-3} - 10^4$
Yalıtkanlar		$< 10^{-10}$

Genel olarak kristal içinde iyonik iletkenliğin ortaya çıkması için şu şartlar gereklidir; *i)* Tek tip iyonların çoğu hareketli olmalıdır, *ii)* Hareketli iyonların atlayabilmesi için çok sayıda boş örgü noktaları olmalıdır, *iii)* İki komşu örgü noktası arasında atlamanın olabilmesi için düşük bir aktivasyon enerji engeline sahip örgü olmalıdır.

Bazı iyonik katılar yapılarında, bir elektrik alan içinde iyonların göç etmesine izin veren noktasal örgü kusurları içerirler. Bu örgü kusurları yük taşıyıcılar olarak görev alırlar. Örgüdeki kusurlardan iyonun hareketi ile iyonik iletkenlik gerçekleşir. İyonik iletkenlik için iyonların bir ya da daha fazla tipinin malzeme boyunca iletilmesi gerekir. Düşük sıcaklıklarda, bir iyonun örgü içinde hareket etmesi için küçük bir alan vardır. Bu alan sadece atomların, bulundukları nokta civarında titreşimi için yeterlidir. İyonların örgü içindeki hareketine örgü çeşitli kısıtlamalar getirir ve hareket rastgele olmaz. Ancak sıfırdan farklı bir sıcaklıkta örgüde kusur meydana getirilirse iyonlar hareket edebileceklerdir. Sıfır sıcaklıkta sistemin serbest enerjisi potansiyel enerji tarafından baskılanır. Sıcaklık artırıldıkça sistemin düzensizliğinin derecesi olan entropinin artmasından dolayı sistemin serbest enerji dağılımı oldukça belirginleşir. Tablo 1.3'te alışimlarda sıkça kullanılan bazı metalik malzemelerin oda sıcaklığında elektriksel iletkenlik değerleri azalan sıralanışa göre verilmiştir.

Tablo 1.3. Alaşımlarda kullanılan bazı malzemelerin oda sıcaklığında elektriksel iletkenlik değerleri [14].

Malzeme	Sembolü	Elektriksel İletkenlik ($\times 10^7 (\Omega \text{ m})^{-1}$)
Gümüş	Ag	6.3
Bakır	Cu	5.96

Malzeme	Sembolü	Elektriksel İletkenlik ($\times 10^7 (\Omega \text{ m})^{-1}$)
Altın	Au	4.52
Alüminyum	Al	3.77
Magnezyum	Mg	2.26
Tungsten	W	1.89
Molibdenyum	Mo	1.87
Kobalt	Co	1.72
Çinko	Zn	1.66
Nikel	Ni	1.43
İndiyum	In	1.16
Lityum	Li	1.08
Demir	Fe	0.993
Platin	Pt	0.966
Kalay	Sn	0.917
Krom	Cr	0.774
Kurşun	Pb	0.481
Uranyum	U	0.38
Antimon	Sb	0.288
Titanyum	Ti	0.234
Neodyum	Nd	0.157
Cıva	Hg	0.104
Bizmut	Bi	0.0867
Plutonyum	Pu	0.0666
Karbon	C	0.0061
Germanyum	Ge	1.45×10^{-7}
Silikon	Si	2.52×10^{-11}
Selenyum	Se	1.0×10^{-11}
Bor	B	1.0×10^{-11}

Sistem artan serbest enerjiyi en aza indirmek ve kararlılığını artırmak için en düşük düzeyde örgü boşluklarına sahip olmalıdır. Bu durum hareketli taneciklerin sürekli örgü kusurlarından hareketi ile gerçekleştirilir [14]. Taneciklerin bu hareketi bir elektrik alan ile yönlendirilerek iletkenlik meydana getirilir. Katı haldeki malzemenin iletkenliği, yük

taşıyıcıların konsantrasyonu, kristalin sıcaklığı, iyonun örgü içinde hareket edebilirliği, kristal içindeki kusurun miktarı gibi özelliklerden etkilenir. Örgüde boşluk kusurları normalde iki metotla meydana getirilir. Bunlardan biri kristalin ısıtılması sonucunda meydana gelen örgü kusurlarıdır. Bir diğer yolu ise safsızlık katkılamaaktır. Sıcaklık ve safsızlık iyonik iletkenliği büyük oranda etkiler. Safsızlık katkılanmış bileşiklerde yüksek sıcaklıkta bu iki etki de iletkenlikte rol oynar. Düşük sıcaklıklarda, elektriksel iletkenlik oldukça azdır. Bu durumda safsızlık etkisi ile meydana gelen kusurlar daha baskındır. Ancak yüksek sıcaklıklara çıktıkça sıcaklık etkisiyle oluşan kusurlar artacağından katı, karışık tip örgü kusur içermeye başlar. Bu durumda gözlenen iletkenlik türü karışık tip iletkenliktir. Elektriksel iletkenliğin artmasının ana nedeni kristal örgüde oluşan örgü kusurlarıdır [14].

Elektriksel iletkenlik ve öz direnç (dirençlilik) bir malzemenin karakteristik özelliğidir. Bir numunenin elektriksel iletkenliğinin belirlenebilmesi için ölçülen voltaj ve akım şiddeti, hesaplanan öz direnç değeri ile numunenin geometrik yapısı arasındaki ilişki kullanılır. Bu nedenle öz direncin hesaplanmasında kullanılan Ohm Kanunu;

$$\frac{V}{I} = R \quad (1.18)$$

eşitliğine, geometrik yapıya bağlı olan bir düzeltme faktörü (resistivity correction factor) değeri ilave edilerek öz direnç hesaplanır. Bu düzeltme katsayısı numunenin kalınlığına ve geometrik yapısına, yüzey büyüklüğüne, numune kenar sınırlarının yapısına, kontakların numune üzerinde bulunduğu konuma ve kontakların düzenine bağlı olarak değişir [15].

Malzemelerin öz dirençlerinin belirlenebilmesi için numune içinde elektrik alan oluşturacak bir akım kaynağına, bu elektrik alan nedeniyle numune içinde meydana gelen I elektrik akımının şiddeti ve keyfi seçilen herhangi iki nokta arasında meydana gelen V potansiyel düşmesinin belirlenmesine ihtiyaç vardır. Bir maddenin elektriksel öz direnci, maddenin üzerinden geçen I akımı ve bunun meydana getirdiği V geriliminin oranı ile bulunur [16].

İki iletken kontak tel ile yapılan elektriksel iletkenlik ölçüm yöntemine *iki nokta (d.c.) elektriksel iletkenlik ölçümü* denir. Burada direncin belirlenebilmesi için V ve I

değerinin doğrudan ölçülmesi yeterlidir. Bu yöntemle yapılan direnç belirleme ölçümünde elde edilen R değeri ileride de belirteceğimiz şartlara bağlı olarak kontakların direncini de içerir. Bu durumda elde edeceğimiz R direnci ve buna bağlı elde edilen ρ elektriksel öz direnç değeri sadece numuneye ait olmayacaktır [17,18].

Direncin elde edilmesi numunenin öz direncinin belirlenmesini sağlar. Homojen bir numunenin elektriksel öz direnci belirlenmek istendiğinde malzemenin geometrik özelliklerinin bilinmesi gereklidir. Elektriksel öz direnç ifadesi aşağıdaki şekilde verilebilir [15].

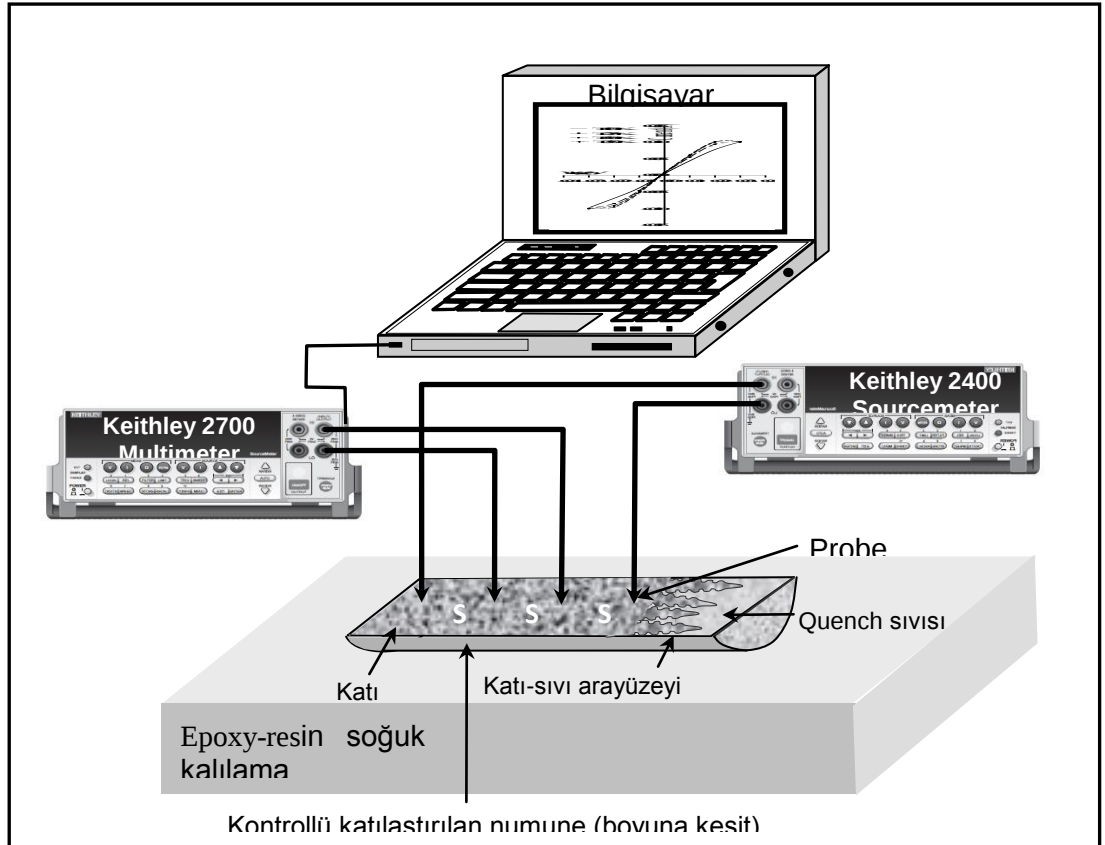
$$\rho = \frac{V}{I} G \quad (1.19)$$

Burada G ; numunenin yüzey geometrik sınırlarını ve kalınlığını, elektriksel kontakların numune üzerindeki konumlarını, kontakların diziliş düzenlerini içeren bir katsayıdır ve “*Geometrik Düzeltme Katsayısı / Faktörü*” (Resistivity Correction Factor, RCF) olarak tanımlanır.

İki nokta (d.c.) elektriksel ölçüm yöntemi ile elde edilen R_{toplam} direnç değeri numunenin direncinin dışında başka ek dirençleri de içerir. Bu ek dirençler iletken telin (R_{tel}), numuneye akımı aktaran iğne uçların (prob, pin) (R_{prob}), gerekirse problemleri numuneye tutturarak iletken lehimin (R_{pasta}), kontak ucu ve numune temas ara yüzeyinin dirençlerinin (R_{kontak}) toplamıdır. Bu nedenle numunenin hesaplanan ρ öz direnci olması gerekenden daha yüksektir.

Numuneye kontak olarak kullanılan iletken teller genel olarak iki parçalıdır ve bu da iki farklı dirençli kontak kullanmak demektir. Bu kontakların bir kısmı, ölçüm cihazlarına bağlı olan iletken tel kablolar ve diğer kısmı da bu kabloların numuneye temas eden uç kısımları olan problemlerdir. Problemler genelde ihtiyaca uygun farklı metallerden yapılır. Bunun nedeni numunenin cinsine göre numuneye sert ve sağlam temasın sağlanmasıdır. Bu gibi durumlardan dolayı sadece numunenin direncini belirleyen bir direnç ölçme tekniği daha uygun olacaktır. Bu durum özellikle kontak direnci numune direncine oranla yüksek olan iyi iletkenlerin ve yarıiletkenlerin öz direncinin belirlenmesinde ortaya çıkar.

Elektriksel iletkenliğin ölçümünde kullanılan diğer bir yöntem olan *dört nokta (d.c.) elektriksel iletkenlik* ölçme tekniğinde, kullanılan kontakların dirençleri ölçümde hesaba girmez ve hesaplanan değer sadece numunenin öz direncidir. Bu amaçla kurulan düzende kontaklardan ikisi numune üzerinden akan akımı ölçmek için, diğer ikisi ise herhangi iki nokta arasındaki potansiyel farkı ölçmek için kullanılır. Şekil 1.13’de görüldüğü gibi 1.ve 4. problardan akım, 2. ve 3. problardan ise potansiyel fark ayrı ayrı ölçüldüğü için iki nokta iletkenlik ölçüm tekniğindeki gibi kontak dirençleri, ölçüme doğrudan dahil olmaz. Yine bu sistemde de kontak direnci söz konusudur ama ölçümün sonucunu çok az etkileyeceğinden ihmal edilebilir. Kontakların aynı doğrultuda dizilmeleri en avantajlı ölçüm şekli olacaktır. Bu durumda G faktörünün belirlenmesi ve hesabı daha kolaydır. Burada s ardışık kontaklar arası mesafedir (Şekil 1.13). Böyle bir ölçüm düzeneğinde yukarıda yer alan ρ öz direnç denklemindeki G katsayısı numune



Şekil 1.13. Dört nokta (d.c.) elektriksel iletkenlik ölçüm sistemi

geometrisine, kontakların numune üzerindeki konumuna ve kontaklar arası s mesafesine bağlıdır.

$$\rho = \frac{V_{23}}{I_{14}} G \quad (1.20)$$

Uygulamada genel olarak yapılan kontak diziliŖi $s_{12} = s_{23} = s_{34} = s$ olan eŖit aralıklı dŖzendir. Bu lm tekniğinde elektriksel özdirenç denklemleri yukarıda verilenden farklı olmamakla beraber yukarıdaki Ŗekildedir.

2. BÖLÜM YÖNTEM VE DENEYSEL ÇALIŞMALAR

2.1. GİRİŞ

Bu çalışmada, ağırlık % 2 (Ag, Sn ve Zn) metalleri katkılanarak hazırlanan Al-ağırlık % 33 Cu ağırlık % 2 x üçlü alaşımlarının hazırlanması ve numune kalıplarına doldurulmasında vakumlu eritme fırını ve döküm fırını kullanılmıştır. Bu bölümde, yapılan deneysel aşamaların detayları verilmiştir.

2.2. NUMUNELERİN HAZIRLANMASI İÇİN DENEYSEL SİSTEM

Bu proje çalışmasında iki ayrı fırın (vakumlu eritme fırını ve döküm fırını) kullanılmıştır. Bu bölümde, deneylerde kullanılan bu fırınlar ayrıntılı olarak anlatılacaktır.

2.2.1 Vakumlu Erime Fırını

Vakumlu eritme fırını alaşım yapılacak metallerin vakumlu ortamda oksitlenmeden eritilmesinde kullanılır. Vakumlu eritme fırını; iç içe geçmiş iki alümina tüp, vakum pompası, sıcaklık kontrolcüsü, sabit güç vermekte kullanılan varyak ve soğutma sisteminden oluşmaktadır. İçteki alümina tüpün iç çapı 50 mm, dış çapı 60 mm ve uzunluğu 700 mm olup bir ucu kapalıdır. Bu alümina tüpün içinde vakumlu ortam sağlanır. Dış alümina tüpün ebatları ise 80 mm × 90 mm × 500 mm olup her iki ucu da açıktır. Dış alümina tüpün etrafına 1.2 mm kalınlığındaki *Kanthal A1* telinden (FeCrAl alaşımından yapılmış tel) 80 sarım sarılmıştır. Isıtıcı telin toplam direnci 28.1 Ω olarak ölçülmüştür. Isıtıcı tellerin birbirine değmemesi için sarımların arasını dolduracak şekilde, tellerin etrafı revatman ile sıvanmıştır. Vakumlu ortam oluşturabilmek için bir ucu kapalı alümina tüpün açık ucuna vakum pompasını bağlayacak şekilde pirinçten bir soğutma sistemi yapılmıştır. Vakumlama esnasında hava sızması için iç alümina tüp ile pirinç soğutma sisteminin arası zift ile yalıtılmıştır. Fırın ısıtıldığında ziftin erimemesi için ise soğutma sisteminden sürekli su dolandırılmaktadır. Fırının sıcaklığı sıcaklık kontrolcüsü ile kontrol edilmektedir. Vakumlu eritme fırını 1100 °C'ye kadar (± 2 °C hassaslıkta) çıkabilmektedir. Eritme işlemi vakum pompası yardımıyla 10^{-3} mbar basınç altında yapılmaktadır.

2.2.2. Döküm Fırını

Döküm fırını; iki ucu açık alümina, alt ısıtıcı, üst ısıtıcı ve soğutma kazanından oluşmaktadır. İç çapı 50 mm, dış çapı 60 mm ve uzunluğu 750 mm olan alümina tüpün etrafındaki farklı iki bölgeye ısıtıcı teller sarılarak birbirinden bağımsız iki ısıtıcı bölge oluşturulmuştur. Isıtıcı tel olarak 1.2 mm kalınlığında *Kanthal A1* teli kullanılmıştır. Alt ve üst ısıtıcıların dirençleri sırasıyla 16.675 Ω ve 9.725 Ω olarak ölçülmüştür. Isıtıcı tellerin birbirine değmemesi için sarımların arasını dolduracak şekilde tellerin etrafı revatman ile sıvanmıştır. Alt ve üst ısıtıcıların sıcaklıklarını ölçmek için ısıtıcıya yakın mesafelere iki adet yalıtılmış K-tipi termal çift yerleştirilmiştir. Alümina tüpün alt tarafına 40 mm çapında ve 160 mm uzunluğunda silindirik bir su kazanı yerleştirilmiştir. Alümina tüpün etrafı ise ısı yalıtımı amacıyla gaz beton (Ytong) tuğlası ile kaplanmıştır. Döküm fırını 1100 °C'ye kadar (± 2 °C hassaslıkta) çıkabilmektedir. akumlu eritme ve döküm fırınları Şekil 2.1'de görülmektedir.



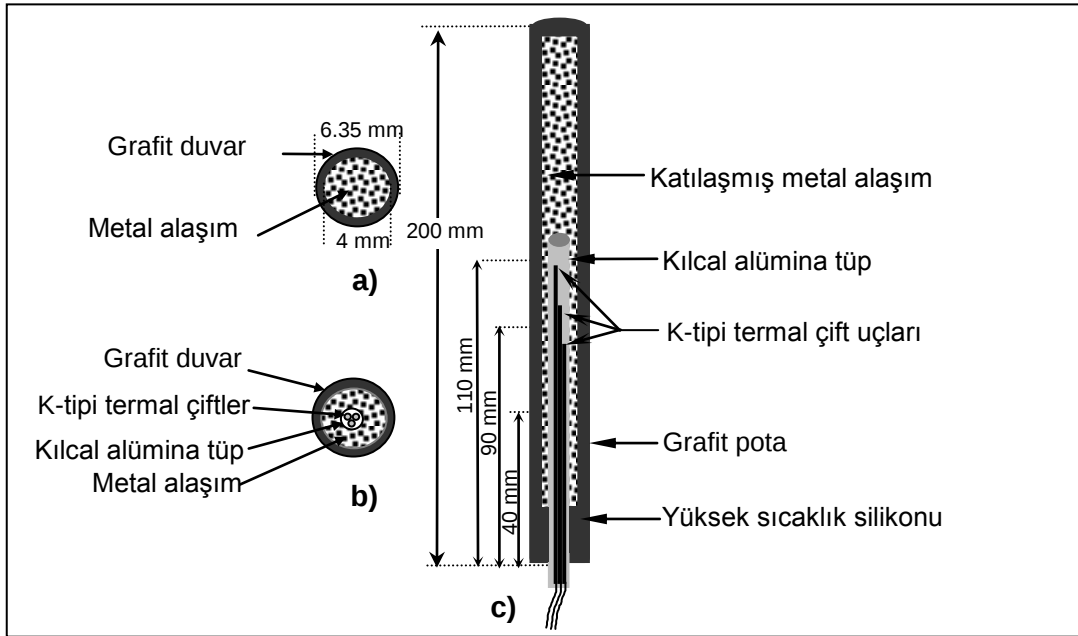
Şekil 2.1. (a) Vakumlu eritme fırını (b) Sıcak döküm fırını

2.3. BİR DENEYİN YAPILIŞI

2.3.1. Numunenin Hazırlanması

Numune pota ve kalıplarının hazırlanmasında iyi bir ısı iletkenliğine ve kolay işlenebilme özelliklerine sahip olması, metalik alaşımlarla reaksiyona girmemesi nedeniyle grafit tercih edilmiştir. Bu amaçla deneysel çalışmalarda kolay işlenebilen, yüksek ısı iletkenliğe sahip, korozyona karşı dayanımı yüksek ve erime sıcaklığı 400 °C ile 1400 °C arasında olan metaller için kullanılabilen *Morgan* marka grafitler kullanılmıştır. Deneylerde numune kalıbı olarak 200 mm uzunluğunda ve 6.35 mm çapında grafit çubuklar kullanılmıştır. Bu grafit çubuklar delinme esnasında kolayca

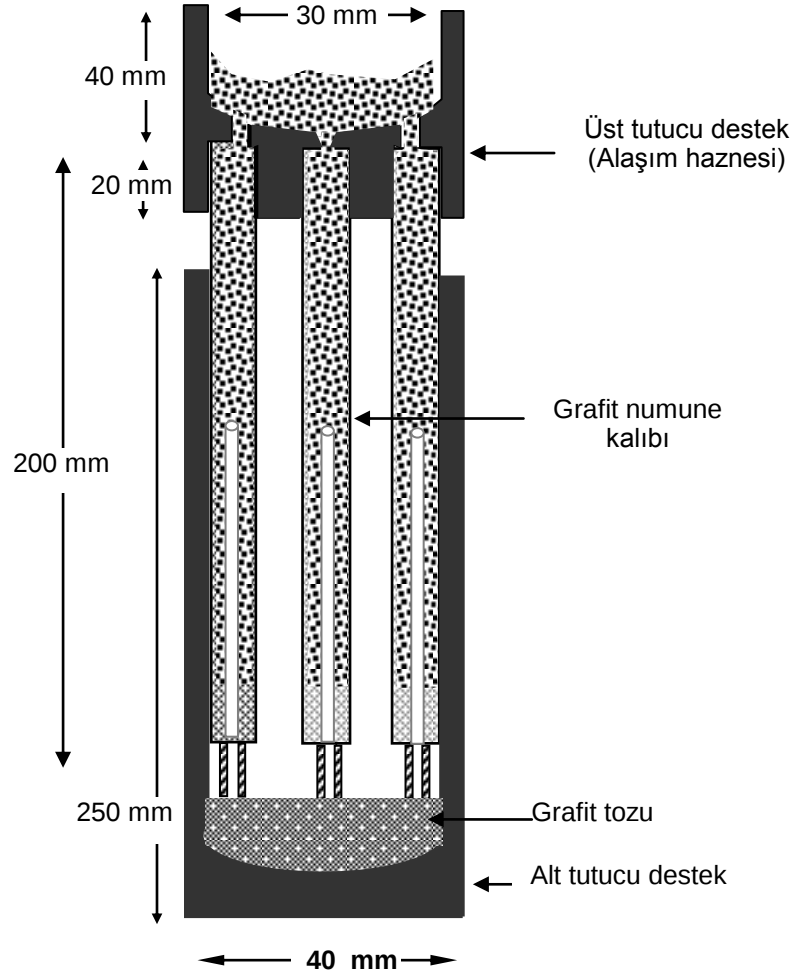
kırılabilirlikleri için, pirinçten yapılmış kalıbın içine yerleştirilerek 4 mm çapında 220 mm uzunluğunda özel matkap uçları ile tornada delinmiş ve böylelikle içi boş grafit kalıplar elde edilmiştir. Şekil 2.2’ de görüldüğü gibi, alümina tüp iki ucu delik olan numune kalıbının bir ucundan geçirilip diğer ucu merkezde olacak şekilde yerleştirilerek sızıntı olmaması için etrafı sıkı bir şekilde cam pamuğu ve silikonla desteklenmiştir.



Şekil 2.2. Grafit numune kalıbı (a) Üst enine kesiti, (b) Alt enine kesiti (c) Yandan görünüşü

2.3.2. Numune Potasının Yapılması

Aynı anda, aynı bileşime sahip alaşımı numune kalıplarına doldurmak amacıyla numune pota kalıbının hazırlanmasına ihtiyaç duyulmuştur. Şekil 2.3’de verildiği gibi, hazırlanan numune kalıplarından 13 adet numune elde edilebilmektedir. Numune potası, alt ve üst olmak üzere 2 adet grafit destekten oluşmaktadır. Alt destek 40 mm çapında, 250 mm uzunluğunda silindirik biçimli grafit parçadan yapılmış ve içerisine 30 mm çaplı 200 mm uzunluğunda bir ucu kapalı kalacak şekilde delik açılmıştır. Üst destek yapımı için 60 mm uzunluğunda, 40 mm çapında bir grafit parça kullanılmıştır. Grafit parçanın bir ucu 30 mm çapında matkap ucu kullanılarak 40 mm uzunluğunda delinmiştir. Diğer ucuna ise 3 mm çapında 20 mm uzunluğunda 13 adet delik açılmıştır. Bu delikler 6.35 mm çapındaki matkap ucuyla 15 mm uzunluğunda genişletilmiştir. Önceden hazırlanmış olan numune kalıplarının açık uçları üst destekteki deliklerden geçirilmiştir.



Şekil 2.3. Numune potası ve alt-üst desteklerin şematik gösterimi

Birleşme noktaları 1200 °C'ye dayanıklı karbon katkılı silikon yapıştırıcı ile tutturulmuştur.

2.3.3. Alaşımın Hazırlanması

İncelenecek olan alaşımların bileşim oranları her birinin faz diyagramları yardımıyla tespit edildi. Alaşım yapımında kullanılan malzemelerin yüksek saflıkta olmasına özellikle dikkat edildi. Yeterince saf olmayan malzemelerle alaşım hazırlandığında safsızlıklar arayüzeyde birikmekte ve deneysel süreçte arayüzeyde oluşan yapı şekillerini olumsuz etkilemektedir. Alaşım üretimi için %99.99 saflıkta alüminyum ve %99.99 saflıkta nikel metalleri kullanıldı. Her bir bileşen, uygun oranlarda 0.1 mg'a duyarlı **AND GX-600** tipi hassas terazi ile tartıldı (Şekil 2.4).



Şekil 2.4. Alaşım metallerinin tartılmasında kullanılan hassas terazi.

2.3.4. Dökümün Yapılması

Alaşım hazırlamada kullanılacak metallerin miktarları hassas terazi ile tartıldıktan sonra alaşımın hazırlanması ve hazırlanan alaşımın numune kalıplarına doldurulması aşamalarına geçildi. Erime sıcaklığı düşük olan metal altta gelecek şekilde metal malzemeler grafit potaya yerleştirildi. Grafit pota uygun bir çengelli tel pota tutucusu yardımıyla vakum fırınına indirildi. Vakum pompası çalıştırılarak fırın vakumlandı. Fırın ısıtılmaya başlamadan önce fırının kapaklarında bulunan ziftin sıcaklığın etkisiyle erimemesi için kapak içlerinden su geçirilerek soğutma yapıldı. Varyak en düşük güç durumunda çalıştırıldı ve yaklaşık her 5 dakikada varyağın değeri %5 artırıldı. Varyağın değerinin artırılmasına fırın istenilen sıcaklığa çıkıncaya kadar devam edildi. Metaller tamamen eridikten sonra vakum kapağı açılarak grafit karıştırıcı çubuk yardımıyla metal eriyik karıştırıldı. Bu işlem 20-25 dakika arayla 4-5 defa tekrarlandı. Böylece eriyik halde alaşım hazırlanmış oldu. Vakumlu eritme fırınında alaşım hazırlama işlemleri devam ederken diğer taraftan döküm fırınında dökümün yapılması ve önceden yapılan numune kalıplarına alaşımın doldurulması hazırlıklarına başlandı. Numune potalarıyla desteklenen numune kalıplarının etrafı cam pamuğu ile sarılarak çevresine sarılan tel yardımıyla fırına indirildi. Dökümü kolaylaştırmak amacıyla kalıp üzerine grafitten yapılmış bir huni yerleştirildi. Döküm sırasında sıvı alaşımın dışarıya taşıp fırına sızmasını engellemek için grafit huni ile alümina tüp arasına yüksek sıcaklığa dayanıklı cam pamuğu sıkıştırıldı. Fırının alt ve üst ısıtıcılarına güç verilerek fırının iç bölgesinin ısıyı çekmesi beklendi. Döküm fırınının varyakları yavaş yavaş artırılarak alt ısıtıcının sıcaklığı alaşımın erime sıcaklığının yaklaşık 50 °C üzerindeki bir sıcaklığa, üst ısıtıcının ise erime sıcaklığının 100-150 °C üzerindeki bir sıcaklığa çıkması sağlandı. Burada amaç vakumlu eritme fırınından eriyik halde çıkarılan alaşımın döküm fırınına

yerleştirilen numune kalıplarına dolması esnasında akışkanlığını koruması ve bu süreç esnasında katılaşmadan kalıp içlerine tam bir dolum yapmasıdır.

2.3.5. Metalografik İşlemler

Döküm fazındaki mikroyapıların gözlemleyebilmek için numune metalografik işlemlere tabi tutulmuştur. Numunelerin kesilmesi, zımparalanması, kalıplanması, parlatılması, ultrasonik temizlenmesi ve dağlanması gibi metalografik işlemler sonunda, açığa çıkan mikroyapıların fotoğrafları SEM yardımıyla çekilmiştir.

Numunelerin zımparalanması silisyum karbür (SiC) taneleri veya %55-75 Al_2O_3 (korindon) ve magnetit tozu içeren zımpara kâğıtlarıyla yapıldı. Kullanılan zımpara kâğıtları ve tane büyüklükleri Tablo 2.1’de verilmektedir. Zımpara kâğıtlarında birim alana düşen tane sayısı (grid) arttıkça mikron cinsinden tane boyutu azalmaktadır. 80-600 gridler kaba, 800-2500 gridler ise ince zımpara olarak sınıflandırılmaktadır.

Tablo 2.1. Bazı zımpara kâğıtları ve tane büyüklükleri [12].

Zımpara Tane No (Grid)	Tane Boyutu (μm)
80	210-177
150	105-88
180	88-74
240	53-45
320	37-31
400	31-27
600	22-18
800	15-11
1000	
1200	
2500	

Numuneler, 80 gridlik zımpara kâğıdından başlayarak 2500 gride kadar, kabadan inceye doğru kademeli olarak zımparalandı.

2.3.6. Numunelerin Parlatılması

Zımparalama ve parlatma işlemleri **Struers LaboPol-5** tipi otomatik parlatma robotu ile yapıldı. Otomatik parlatma robotunun fotoğrafı Şekil 2.5’de verilmiştir. Öncelikle parlatma robotun disklerine farklı tane büyüklüklerine sahip zımparalar takıldı. Cihazın su modu açılarak numunelere sulu zımparalama yapması sağlandı. Böylelikle numunenin hem ısınması engellendi hem de homojen bir temas sağlandı.

Zımparalamanın düzgün ve itinalı yapılması fotoğraf çekmede odaklama kolaylığı sağlamaktadır. Her bir zımparalama kademesinden sonra numune yüzeyinin düz olmasına ve derin çiziklerin giderilmiş olmasına dikkat edildi. Daha sonra dönüş hızı ve baskı basınç değeri ayarlanabilen otomatik parlatma robotunun disklerine, parlatılacak numuneye uygun parlatma kumaşları takıldı. Kaba ve ince parlatma için farklı tane büyüklüğüne sahip elmas süspansiyonlar kullanıldı.

Parlatma işleminde kullanılan elmas süspansiyonlar sırasıyla 6 μm , 3 μm , 1 μm , 0.25 μm ve 0.05 μm tane büyüklüğüne sahip elmas çözeltilerdir. Parlatma sırasında her bir elmas süspansiyon için ayrı metal diskler üzerine yapıştırılmış parlatma kumaşları kullanıldı. Numune ile parlatma kumaşı arasında yumuşak bir temas sağlamak ve nem miktarını ayarlamak amacıyla parlatıcı ile birlikte **Struers Depif** yağlayıcı (lubrikant) kullanıldı. Parlatma sırasında disk dönerken nem azaldıkça, numune yüzeyine parlatıcı çözeltiler yapışabilmekte ve yüzeyde leke oluşturabilmektedir. Disk üzerindeki kumaşın kurumaması için zaman zaman çözelti veya yağlayıcı ilavesi yapıldı.



Şekil 2.5. Otomatik zımparalama ve parlatma ünitesi

6 μm , 3 μm ve 1 μm 'lik parlatma çözeltileri kullanılırken numune üzerine her numunede farklı olmak üzere kuvvet (20-50 N) uygulandı. 0.25 μm ve 0.05 μm 'lik parlatma çözeltileri kullanılırken uygulanan kuvvetin büyüklüğü azaltıldı. Numuneler her bir çözelti ile ortalama 5-10 dakika parlatıldı. Parlatma sırasında elmas çözeltinin disk üzerinde homojen dağılmasına dikkat edildi. Her aşama sonunda numune bol damıtık su ile yıkandı ve ultrasonik temizleme işlemine tabi tutuldu.

Her bir parlatma kademesi değişimde 5-10 dakika süreyle ultrasonik temizleme yapılarak numune yüzeyde biriken kirlilikler temizlendi. Bazı durumlarda parlatma kademesi değişimde numune yüzeyi bol suyla yıkansa bile yüzeyde bulunan kalıntılar tam olarak temizlenememektedir. Böyle durumlarda numunelere ultrasonik temizleme uygulanır.

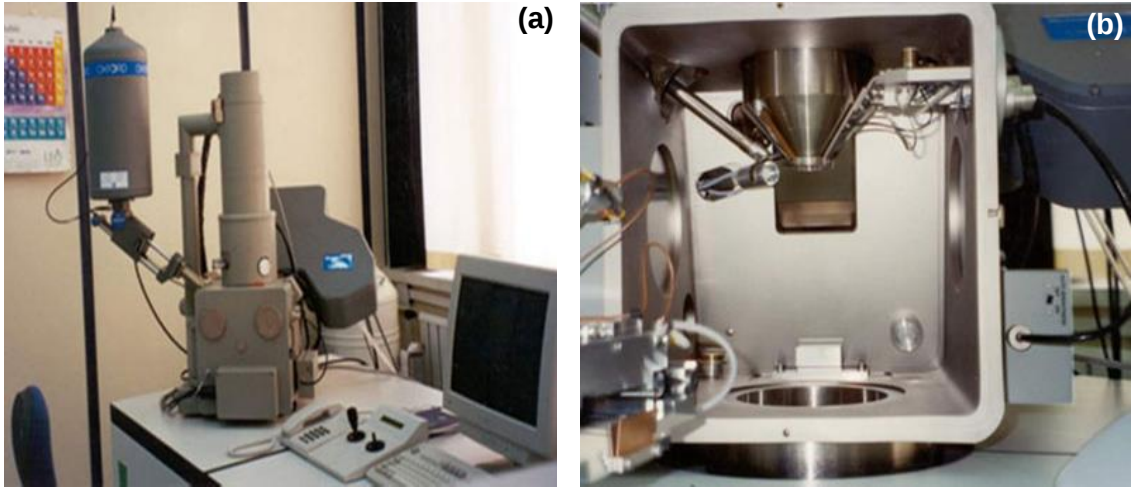
2.3.7. Mikroyapıların Gözlenmesi

Üretilen ve metalografik işlemlere tabi tutulan her bir numunenin mikroyapı fotoğrafları taramalı elektron mikroskobuyla (*SEM*) çekildi. Numunelerin *SEM* fotoğraflarının çekilmesinde **LEO 440** marka bilgisayar kontrollü dijital taramalı elektron mikroskobu (*SEM*) kullanıldı. Bu mikroskop, 40 kV hızlandırma voltajlı ve Secondary-Backscattered elektron detektörüne sahip $\times(5-300\ 000)$ kat büyütme kapasitelidir. Ayrıca farklı fazların tane yönelimini tespit edebilme özelliği bulunmaktadır. Şekil 2.6'da kullanılan *SEM* mikroskobunun fotoğrafı verilmektedir.

SEM ile fotoğraf çekimine geçmeden önce, parlatılmış ve dağlanmış olan numuneler, kaplama ünitesine yerleştirildi ve yüzeyleri yaklaşık 10-40 nm inceliğinde gümüş tabaka ile kaplanarak vakum altına alındı. Burada elektron demetinin yüzeyden daha iyi saçılması ve görüntünün daha iyi kontrast ve netliğe sahip olması amaçlanmıştır. Bu işlemten sonra gümüş tabaka ile kaplanmış numuneler, *SEM*'in vakum haznesi içindeki numune tablası kısmına yerleştirilerek numunelerin uygun bölümlerinden farklı büyütmelerde fotoğrafları çekildi.

2.3.8 Mikrosertlik Değerlerinin Ölçülmesi

Numunelerin mikroyapı fotoğrafları optik görüntü sistemi ve *SEM* mikroskobuyla çekildikten sonra mikrosertlik ölçümlerine geçildi. Mikrosertlik ölçümlerinde, şematik



Şekil 2.6 Taramalı elektron mikroskobu (SEM)

yapısı Şekil 2.7’de verilen **Future Tech FM-700** model dijital mikrosertlik ölçüm cihazı kullanılmıştır. Bu cihaz 10 g, 25 g, 50 g, 100 g, 200 g, 300 g, 500 g ve 1000 g’lık yük uygulayabilen, %5 hassasiyette ölçüm alabilen ve elektronik olarak mikrosertlik değerini kendisi hesaplayabilen bir cihazdır. Kendi üzerinde fotoğraf çekme ünitesi olup $\times 200$, $\times 500$ ve $\times 1000$ büyütme değerlerindeki objektiflerle fotoğraf çekebilme özelliklerine sahiptir.

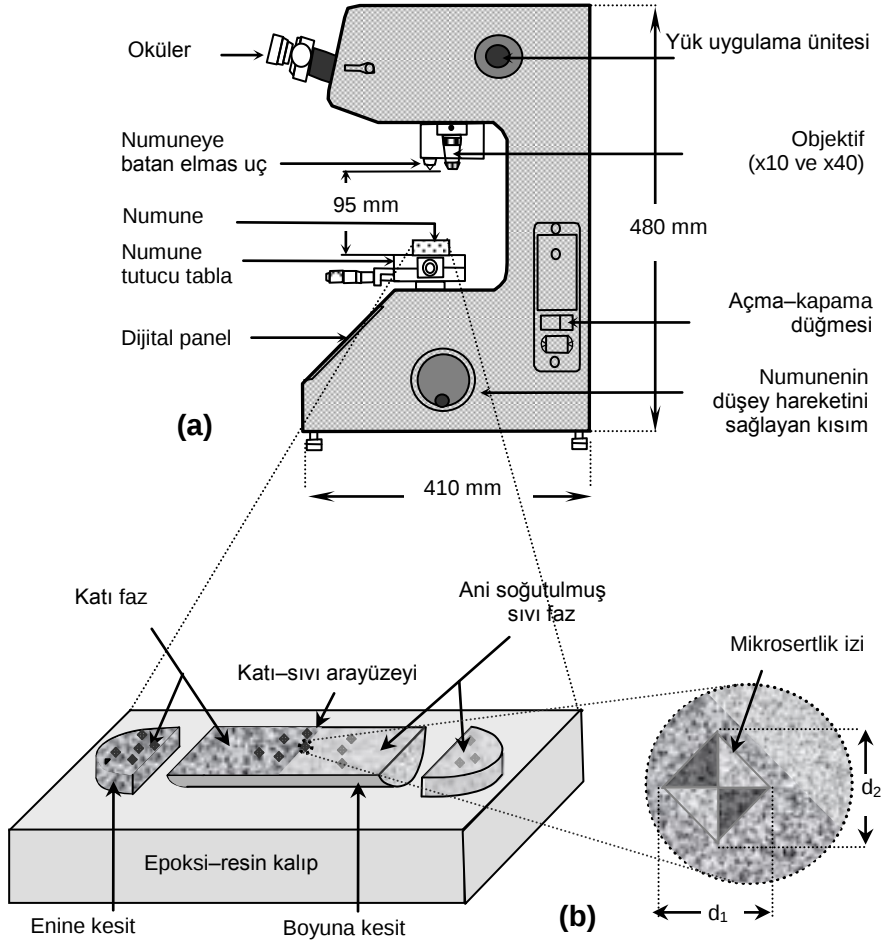
Beş farklı katılaştırma hızında katılaştırılan numuneler sırasıyla ölçüm cihazına bağlanarak, her bir numunenin kesitinden 8–12 adet mikrosertlik ölçümleri alınmıştır. Katılama elemtlerinin, mikrosertliğe olan araştırılmıştır.

2.3.9. Çekme–Dayanım Değerlerinin Ölçülmesi

Dökümü yapıp katılaştırılan numunelerin her birinden ikişer adet yapılmıştır. Çünkü çekme–dayanım testi için en az 50 mm uzunluğunda katılaşmış kesite ihtiyaç duyulmuştur. Böylece mikroyapı belirlenmesi ve elektriksel özellikler için ilk numune kullanılırken aynı şartlar altında katılaştırılan ikinci numuneler çekme–dayanım testi için kullanılmıştır.

Katılaştırılarak hazırlanan 4 mm çaplı ve en az 50 mm uzunluğundaki numuneler **Shimadzu** marka çekme–dayanım cihazının çeneleri arasına sıkıca yerleştirildikten sonra 20 mm/dak hızlarında çekilerek gerilme–uzama eğrileri elde edilmiştir. Böylece

elde edilen eğrilerden her bir numunenin çekme-dayanım değeri belirlenerek katkı malzemeleri ile değişimi tanımlanmıştır.



Şekil 2.7. (a) Mikrosertlik ölçüm cihazının şematik gösterimi, (b) Numune üzerinde cihazın bıraktığı izin detayları.

2.3.10. Elektriksel Özdirenç Değerlerinin Ölçülmesi

Hazırlanan kompozisyondaki her bir alaşımın elektriksel özdirenç değerlerinin ölçümünde dört nokta iletkenlik ölçüm metodu kullanılmıştır. Ölçümler için **Keithley 2400** marka programlanabilir güç kaynağı, **Keithley 2700** marka multimetre ve **Protherm** marka kül fırınından faydalanılmıştır (Şekil 2.8).

Ölçümlerde gümüş tellerin çubuk şekilli numunelere doğrudan teması (kontak) sağlandı. Ölçümler, her bir numune için oda sıcaklığında 0.1 s'de bir olmak üzere 100 defa ölçüm alınarak yapıldı. Elde edilen ölçüm sonuçları grafiklerle ve tablolarla verilmiştir.



Şekil 2.8. Elektriksel iletkenlik ölçümünde kullanılan düzenek fotoğrafı.

3. BÖLÜM DENEYSEL SONUÇLAR

Bu bölümde Al-ağ.%33Cu ötektik alaşımına yapılan katkı maddeleri [ağ.% 2(Ag, Sn ve Zn)] metalleri ile hazırlanan üçlü alaşım sistemlerinin alaşımlara ait mekanik (mikrosertlik ve çekme dayanımı) ve elektrik (elektriksel öz direnç) özellikleri deneysel olarak ölçülmüştür.

3.1. Döküm Fazındaki Numunelerin Mikroyapılarının İncelenmesi

Al-%33Cu-%2x (x=Ag, Sn, Zn) alaşım sistemlerinin mikroyapısı çubuksal formda elde edilmiştir. Şekil 3.1’de görüldüğü gibi çubuksal mesafelerin ölçümü hem enine hem de boyuna kesit üzerinden yapılmıştır. Ölçümler yapılırken üç metot kullanılmıştır. Bu metotlar sırasıyla *kesişim metodu*, *üçgen metodu* ve *alan sayım metodu*’dur. Boyuna kesit üzerinden ölçümde ara yüzeye paralel ve çubukları dik olarak kesen bir çizgi çizilir ve bu çizgi boyunca kaç tane çubuk kestiği sayılarak hesaplama yapılır. Bu ölçüm metodu kesişim metodu olarak adlandırılır. Enine kesit üzerinden ölçüm ise üçgen metodu ve alan sayım metodu ile yapılmıştır. Enine kesit üzerinde yapılan ölçümler daha güvenilir, çünkü boyuna kesit ölçümleri parlatma düzlemine göre değişmektedir. Kesişim metodunda çubuklara dik olarak bir çizgi çizilerek bu çizgi içine kaç tane çubuk girdiği sayılarak hesaplamalar yapılmıştır. Üçgen metodunda noktalar bir üçgen oluşturacak şekilde birleştirilerek noktalar arası mesafeler ölçülmüş ve büyütme faktörüne bölünerek gerçek ölçekteki mesafeler tayin edilmiştir. Alan sayım metodunda ise belli büyüklükte alan seçilmiş ve bu alan içerisine giren noktalar sayılarak verilen formül yardımıyla mesafeler hesaplanmıştır. Bu formülde M büyütme faktörü, A, alan, N ise alan içerisine giren noktaların sayısıdır.

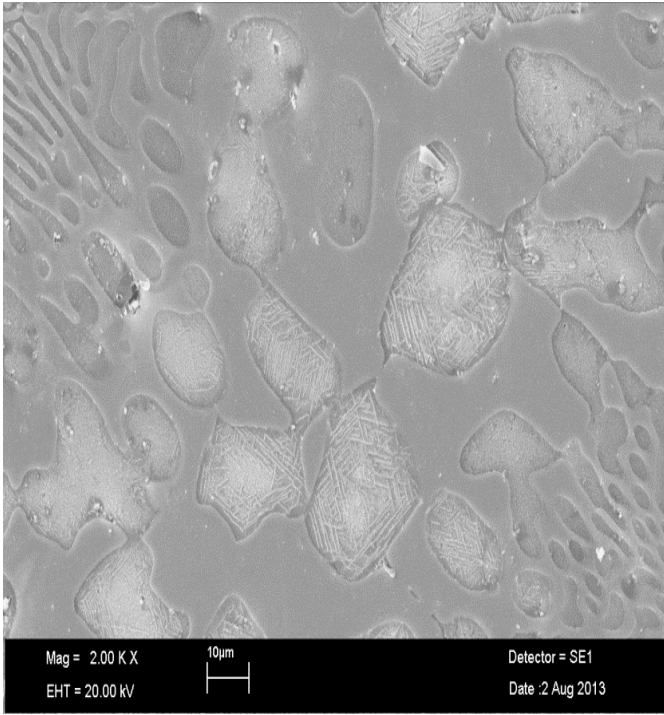
Boyuna kesitten ölçülen ötektik mesafeler kimi yerde maksimum kimi yerde ise minimum olmaktadır. Bunun sebebi pozitif ve negatif sonlanmalardır. Pozitif sonlanma α lamelinin çatallanarak ikiye ayrılması ve iki çatal arasında yeni bir β fazının oluşmasıdır. Negatif sonlanma mekanizması ise komşu iki β fazının α fazından daha hızlı büyüyerek birleşmesi ve bir β fazının yok olmasıdır.

3.2. Fazların Kimyasal Bileşimlerinin Belirlenmesi

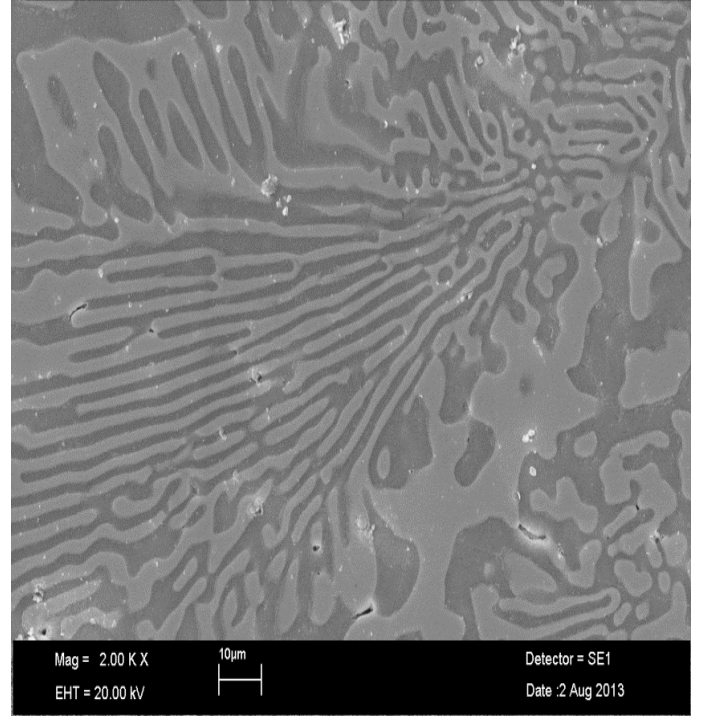
Her bir alaşım sistemine ait numunelerden *SEM* fotoğrafları çekildikten sonra bu fotoğraflarda belirginleşen her bir fazın kimyasal bileşim analizleri (*EDX*) yapılmıştır. Şekil 3.1’de her bir numunenin enine kesitlerinden çekilen *SEM* fotoğrafı gösterilmektedir. Her bir sistem için elde edilen numunelerde faz diyagramlarında da tanımlandığı gibi bazı fazlar birbirinden ayrılmıştır. İncelenen alaşımlarda belirginleşen her bir fazın nokta bileşim analizleri yapılmıştır. Şekil 3.2’de verilen mikroyapı fotoğrafında Al-%33Cu-%2Ag alaşımında beyaz lamelsel Al_2Cu intermetalik fazı ile AlCuAg intermetalik fazı, şekil 3.3’de verilen mikroyapı fotoğrafında Al-%33Cu-%2Zn alaşımında beyaz lamelsel Al_2Cu intermetalik fazı ile AlCuZn intermetalik fazı ve şekil 3.4’de verilen mikroyapı fotoğrafında Al-%33Cu-%2Sn alaşımında beyaz lamelsel Al_2Cu intermetalik fazı ile AlCuSn intermetalik fazı olmak üzere iki farklı fazın büyüdüğü gözlenmiştir. Şekillerde de gösterildiği gibi bu fazların;

- Ana (matrix) fazın; AlCuAg, AlCuZn ve AlCuSn intermetalik fazı,
- Beyaz lamelsel fazın; Al_2Cu intermetalik fazı,

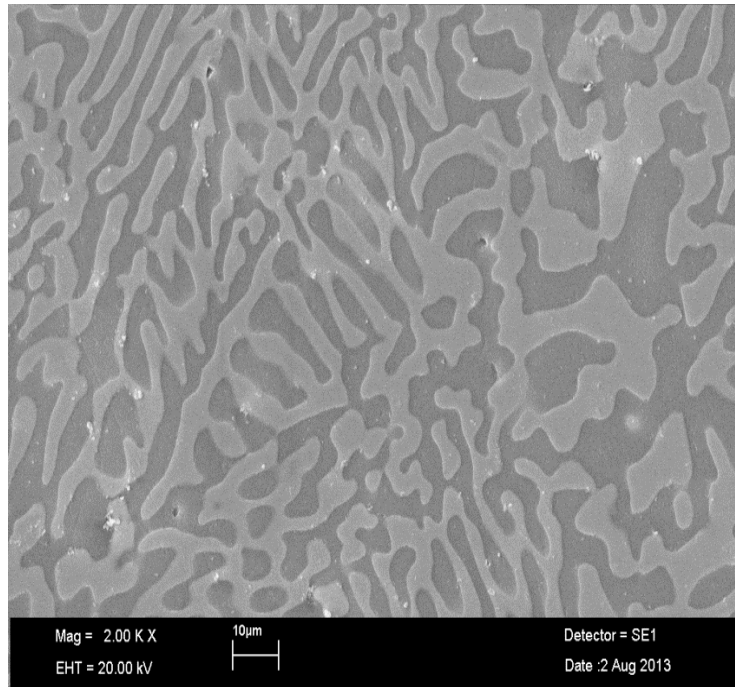
olduğu belirlenmiştir.



(a)Al-%33Cu-%2Ag

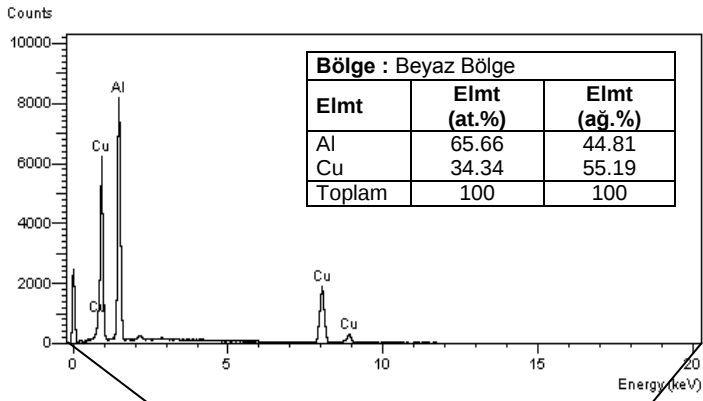


(b)Al-%33Cu-%2Sn

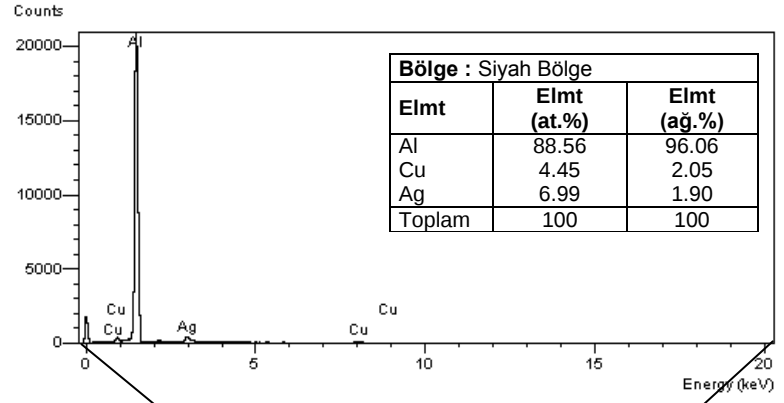


(c)Al-%33Cu-%2Zn

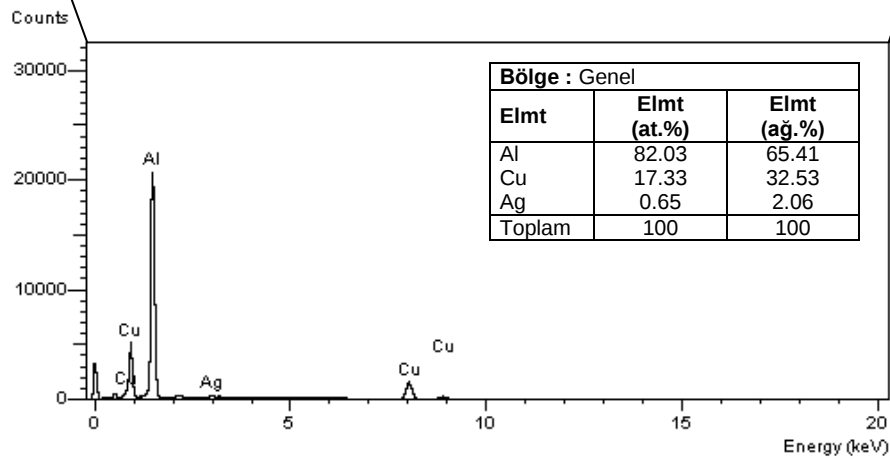
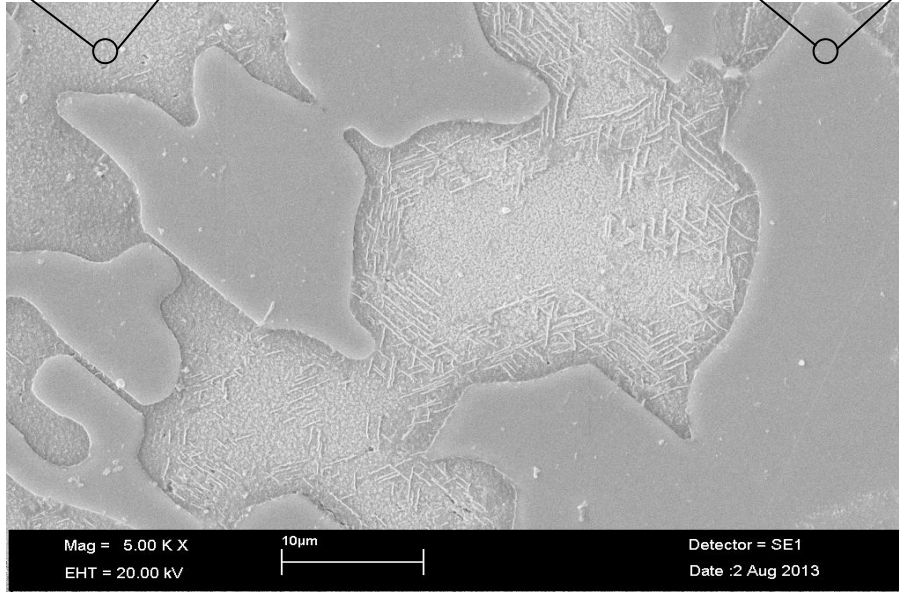
Şekil 3.1 (a) Al-%33Cu-%Ag (b) Al-%33Cu-%Sn c) Al-%33Cu-%Zn alaşımlarının oluşan mikroyapıların bazı enine kesit SEM fotoğrafları.



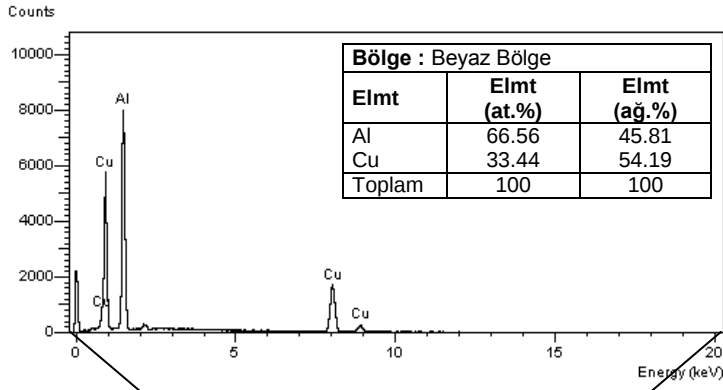
Al₂Cu intermetalik fazı



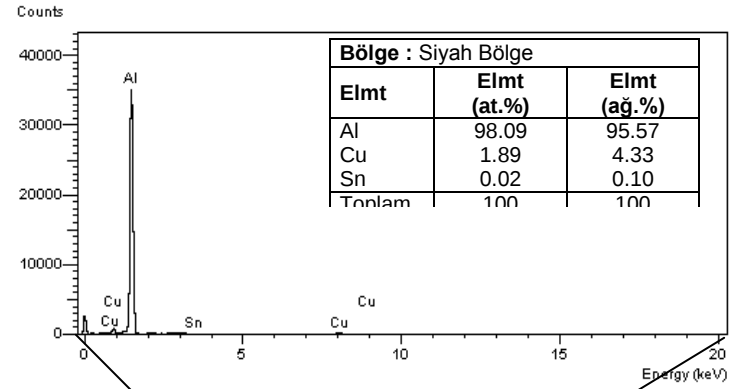
AlCuAg intermetalik fazı



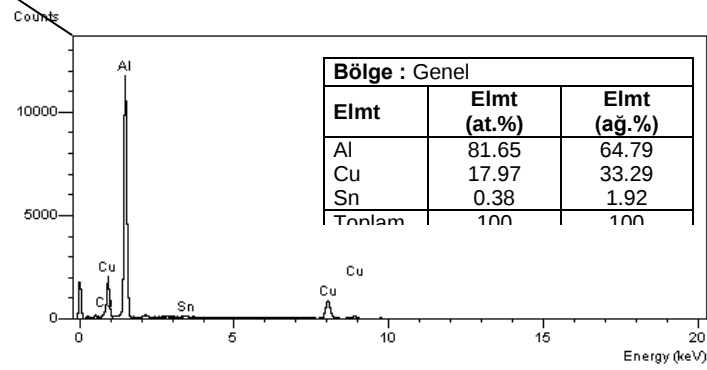
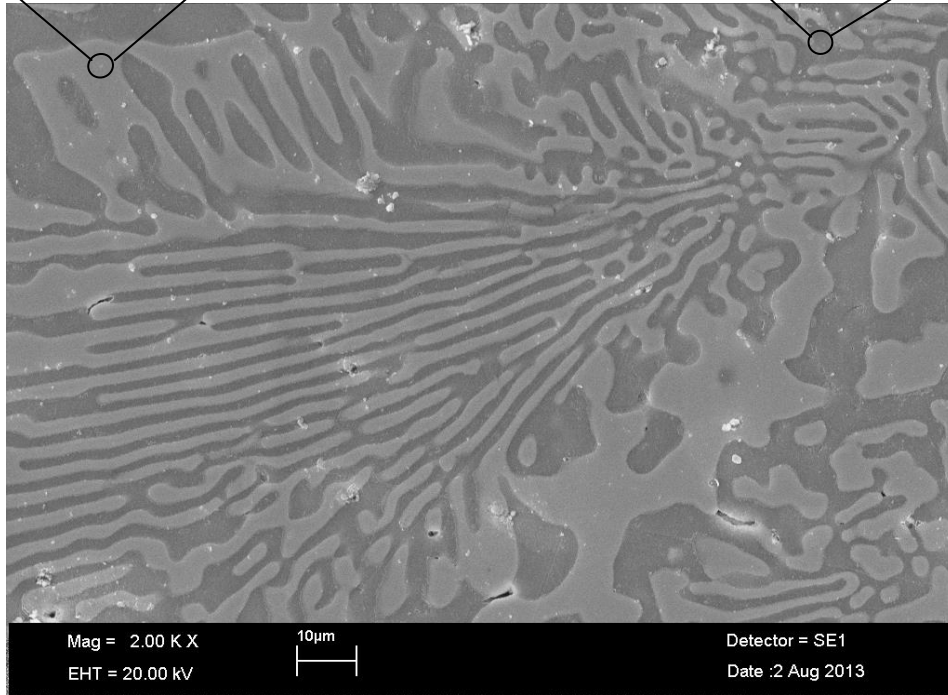
Şekil 3.2 Al-33Cu-2Ag alaşımının kimyasal bileşim analizi (EDX).



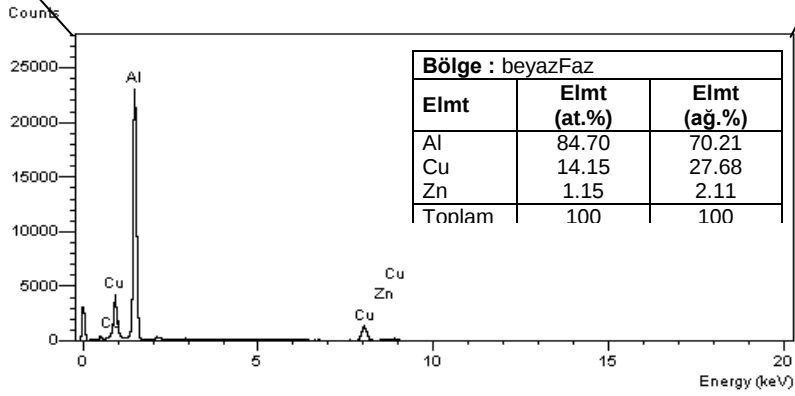
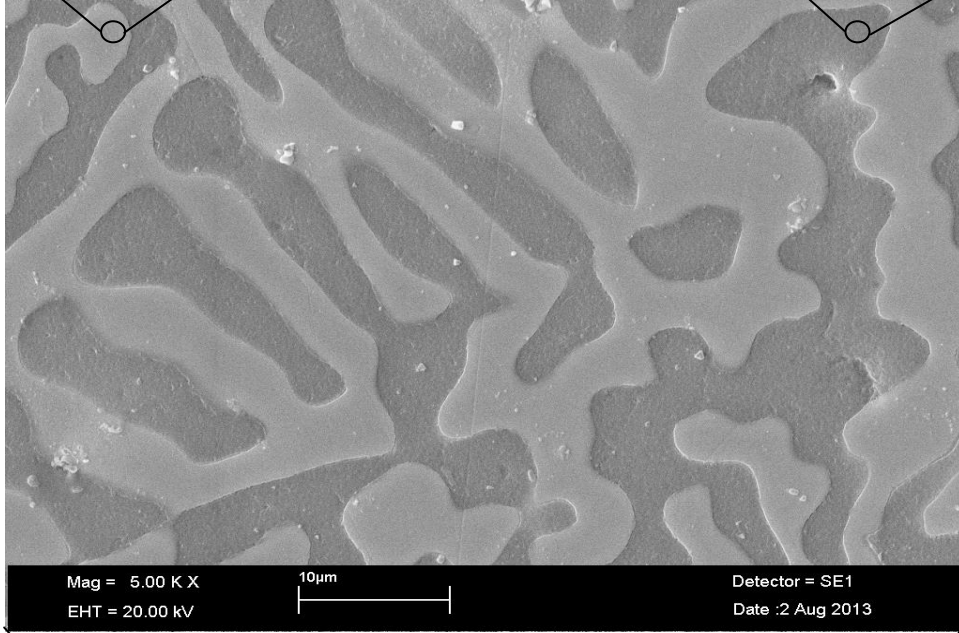
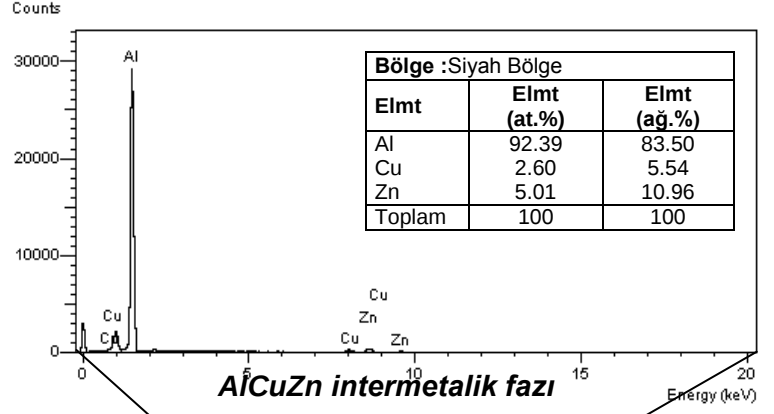
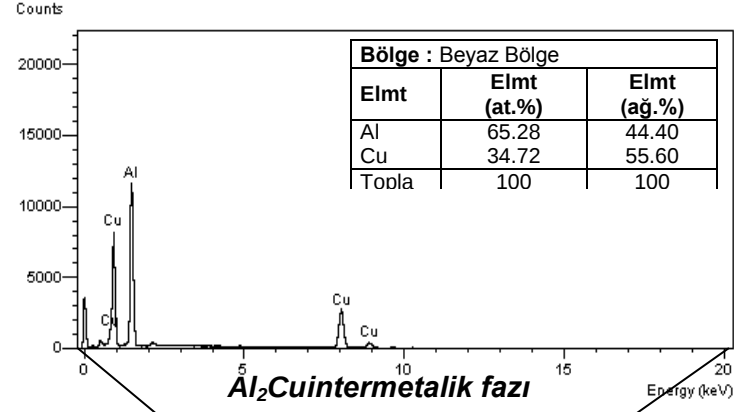
Al₂Cu intermetalik fazı



AlCuSn intermetalik fazı



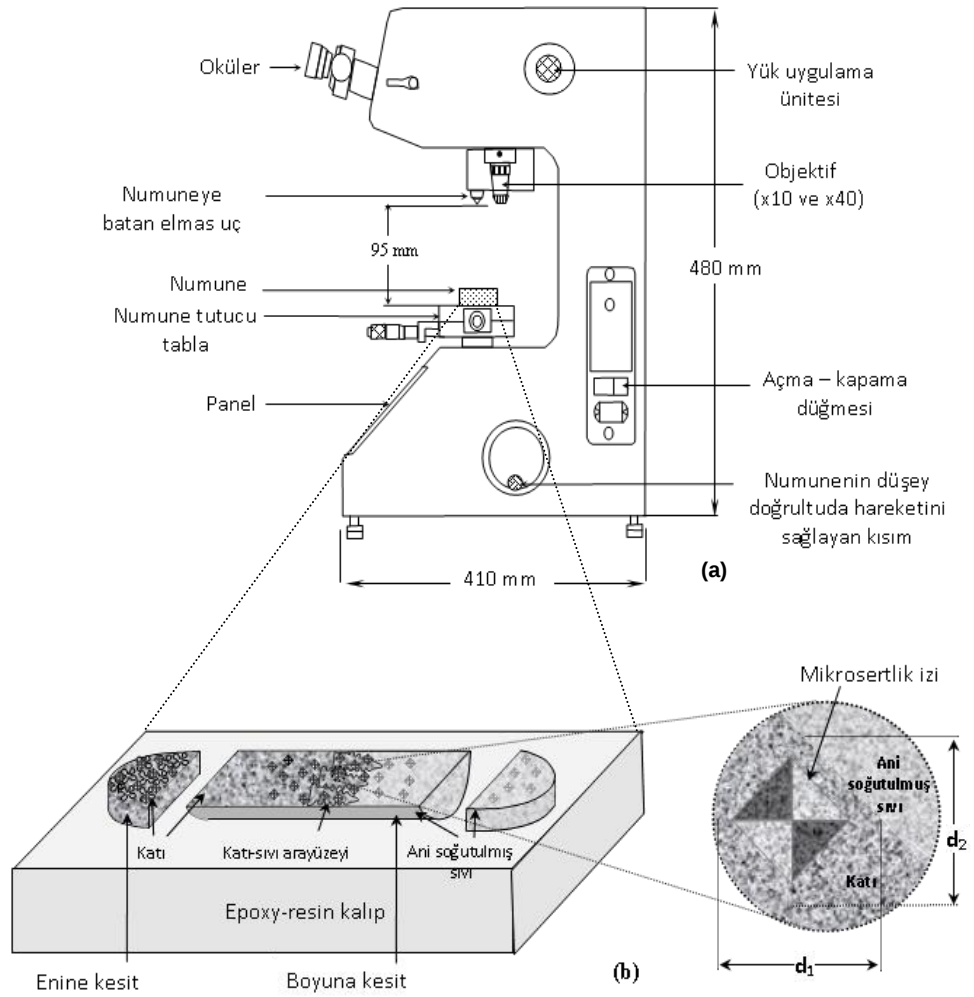
Şekil 3.3 Al-33Cu-2Sn alaşımının kimyasal bileşim analizi (EDX).



Şekil 3.4 Al-33Cu-2Zn alaşımının kimyasal bileşim analizi (EDX).

3.3 Mikrosertlik Ölçümleri

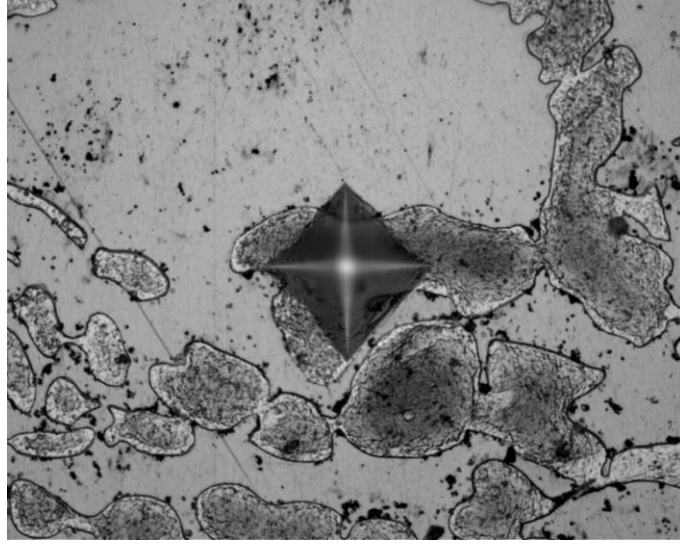
Mikrosertlik ölçümlerinde, şematik yapısı Şekil 3.5’de görülen *Future Tech FM-700* model dijital mikrosertlik test cihazı kullanılmıştır. Bu cihaz, 10 g, 25 g, 50 g, 100 g, 200 g, 300 g, 500 g ve 1000 g’lık yük uygulayabilen %5 hassasiyette ölçüm alabilen ve elektronik olarak sertlik değerini kendisi hesaplayabilen bir cihazdır. Kendi üzerinde fotoğraf çekme ünitesi olup $\times 10$, $\times 40$ büyütme değerlerindeki objektiflerle fotoğraf çekebilme özelliklerine sahiptir.



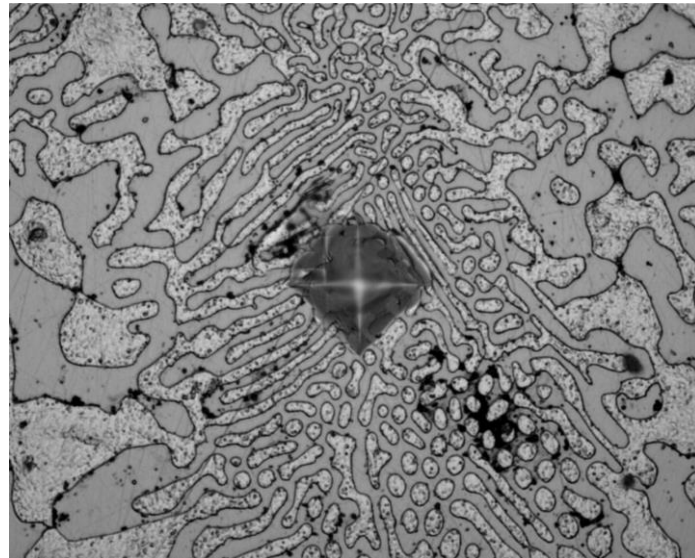
Şekil 3.5 (a) Mikrosertlik ölçüm cihazının şematik gösterimi.
(b) Numune üzerinde cihazın bıraktığı izin detayları

Numuneler sırasıyla test cihazına bağlanarak, her bir numunenin mikrosertlik değeri güvenilirliği artırmak için (HV) 8-12 farklı noktadan ölçülerek ortalaması alınmıştır. Şekil 3.6’de katılaştırılmış Al-33Cu-2Zn, şekil 3.7’de Al-33Cu-2Ag ve şekil 3.8’de Al-33Cu-2Sn alaşım sistemlerinde enine kesitten alınan mikrosertlik ölçümleri

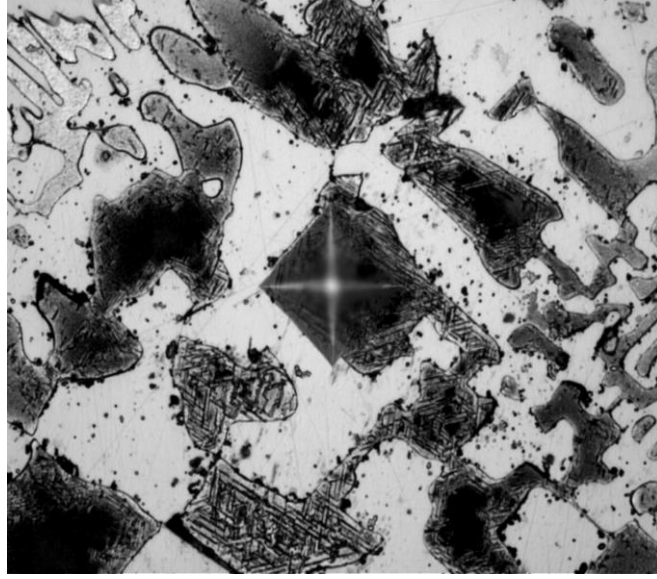
esnasında sertlik ölçüm cihazının numunelerde oluşturduğu izleri gösteren örnek *SEM* fotoğrafları verilmektedir. Al-Cu ötektik alaşımına yapılan katkılama elementleri (Ag, Sn, Zn) ile yapılan alaşımların mikrosertlik değerleri Şekil 3.9 ‘da verilmiştir.



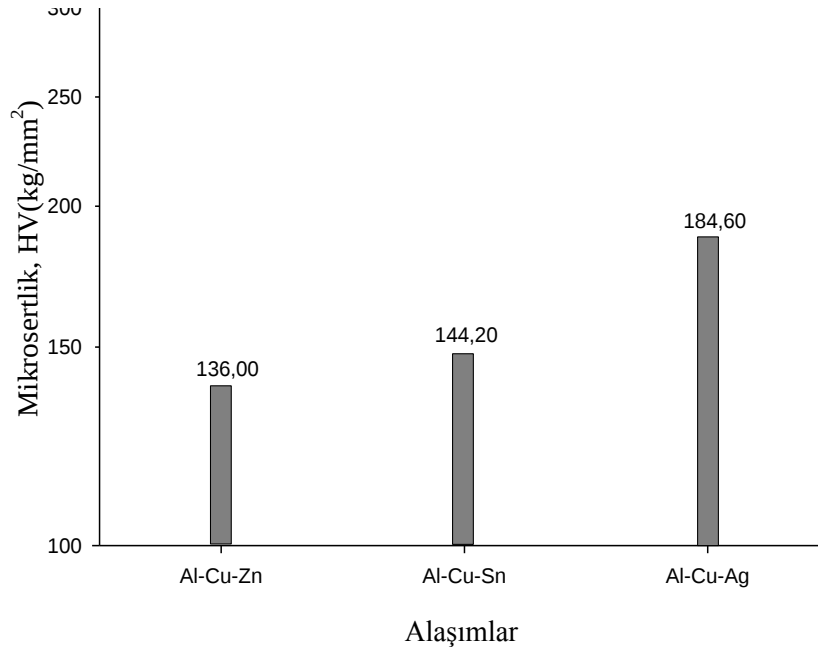
Şekil 3.6 Al-33Cu-2Zn alaşımının sertlik iz fotoğrafı.



Şekil 3.7 Al-33Cu-2Ag alaşımının sertlik iz fotoğrafı.



Şekil 3.8 Al-33Cu-2Sn alaşımlarının sertlik iz fotoğrafı.

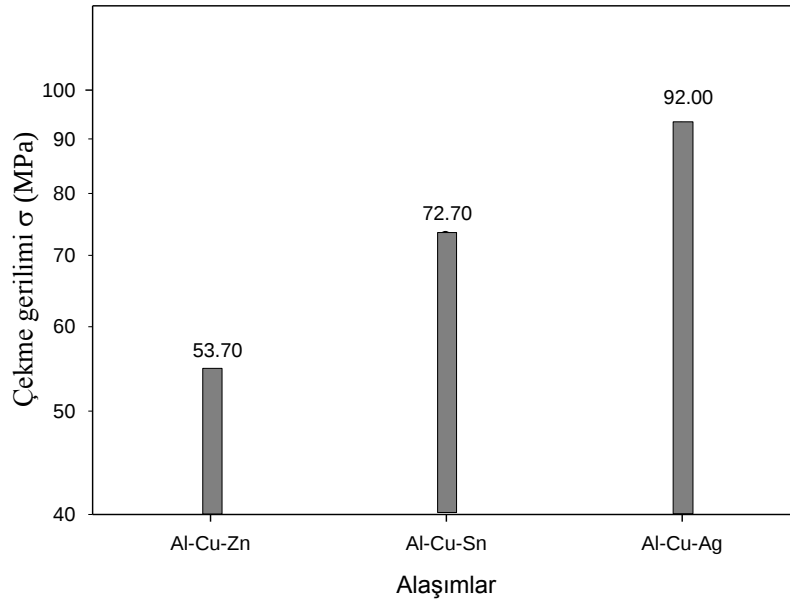


Şekil 3.9 Mikrosertlik değerlerinin katkılama elementine göre değişimi.

Al-33Cu ötektik alaşımına yapılan farklı katkı malzemesinin ölçülen sertlik Şekil 3.9'da görüldüğü gibi Al-33Cu-2Zn alaşımı 136 kg/mm², Al-33Cu-2Sn alaşımı 144,2 kg/mm², Al-33Cu-2Ag alaşımı 184,6 kg/mm² değerleri ölçülmüştür. Bu değerlerdende anlaşılacağı gibi en düşük sertlik değerine sahip malzeme Al-Cu-Zn iken en yüksek sertlik değerine sahip malzeme ise Al-Cu-Ag olarak ölçülmüştür.

3.4 Çekme-Dayanımı Ölçümleri

Döküm fazındaki numunelerin mikroyapı ölçümleri ve sertlik değerlerinin belirlenmesinden sonra, 2. Bölüm’de anlatıldığı gibi çekme–dayanım testine geçilmiştir. Her bir numune en az 50 mm uzunluğunda kesilerek, çekme–dayanım test cihazına çeneleri arasında sıkıştırıldıktan sonra, 20 mm/dak’lık hızlarda çekme yapılarak kopması sağlanmış ve çekme–dayanım değerleri, MPa cinsinden ölçülmüştür. Ölçülen çekme–dayanım değerleri değişen katkı malzemelerine göre ayrı ayrı incelenmiştir.



Şekil 3.10 Çekme-Dayanım değerlerinin katkı malzemelerine göre değişimi

Şekil 3.10’da Al-33Cu ötektik alaşımına yapılan katkı malzemelerine göre çekme dayanım testlerinden elde edilen ölçüm sonuçları verilmektedir. Al-Cu ötektik alaşımına yapılan katkı malzemelerinin Zn, Sn ve Ag ile elde edilen numunelerinin çekme dayanım değerleri sırasıyla 53,7 Mpa, 72,7 MPa, 92 MPa olarak ölçülmüştür. Şekildende anlaşıldığı gibi elde edilen ölçümlerde en düşük çekme-dayanım değerine sahip numune Al-33Cu-2Zn, en yüksek çekme-dayanım değerlerine sahip numune ise Al-33Cu-2Ag olarak ölçülmüştür.

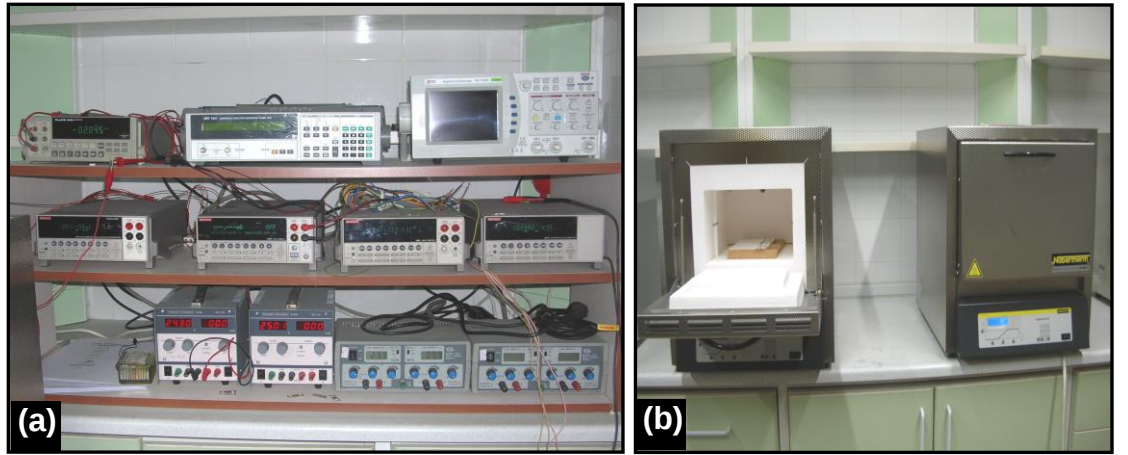
3.5. Elektriksel Özdirenç Ölçümleri

Malzemelerin elektriksel özellikleri belirlemek için dört nokta (four probe) yöntemi çok yaygın olarak kullanılmaktadır. Numune yüzeyinde dört noktadan kontak yapılır.

Kontaklardan ikisi akım kaynağında diğer ikisi de voltaj ölçümünde kullanılır. Dört nokta yönteminin kullanılmasıyla metal prob ve malzeme arasındaki kontak direnci ve diğer prob ve yayılma direnci gibi dirençler elimine edilir. Voltaj düşmesi ve akım ölçülerek elektriksel özdirenç ve iletkenlik sırasıyla ($\rho=2\pi s(V/I)$) ve ($\sigma=1/\rho$) bağıntılarıyla hesaplanır. Burada ρ özdirenç, σ iletkenlik katsayısı, V voltaj düşmesi, I akım ve s içteki iki prob çifti arasındaki mesafedir.

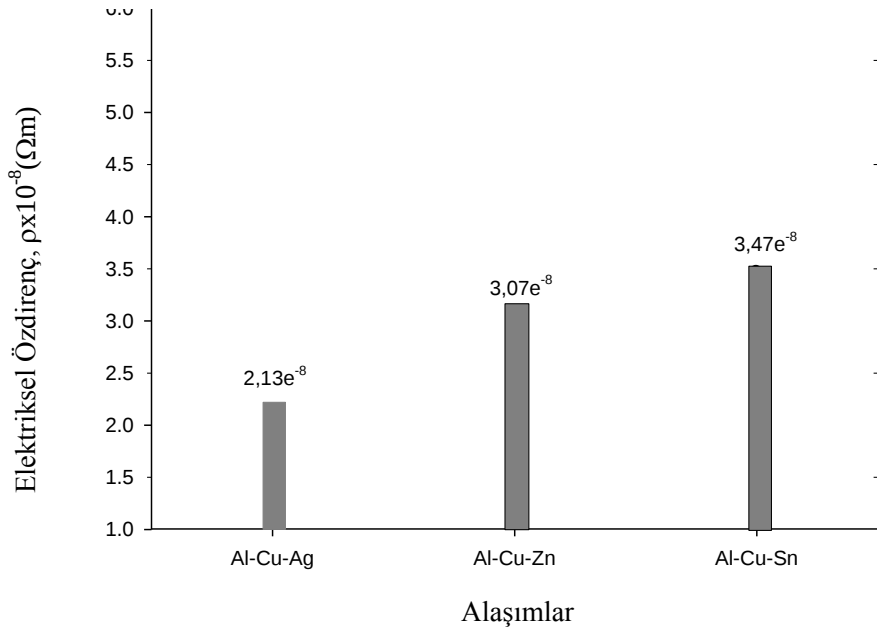
Bu projenin kapsamında, döküm fazındaki Al-Cu-x (x=Ag, Sn ve Zn) alaşımlarının oda sıcaklığında elektriksel özdirenç değerleri ölçülmüştür. Ayrıca döküm fazındaki Al-Cu-x (x=Ag, Sn ve Zn) alaşımlarının sıcaklığa bağlı olarak elektriksel özdirenç değerleride ölçülmüştür.

Elektriksel özdirenç ölçümleri dört nokta iletkenlik ölçüm metodu ile yapılmıştır. Ölçümler için **Keithley 2400** marka programlanabilir güç kaynağı, **Keithley 2700** marka multimetre ve **Norterm** marka kül fırınından faydalanılmıştır (Şekil 3.11).



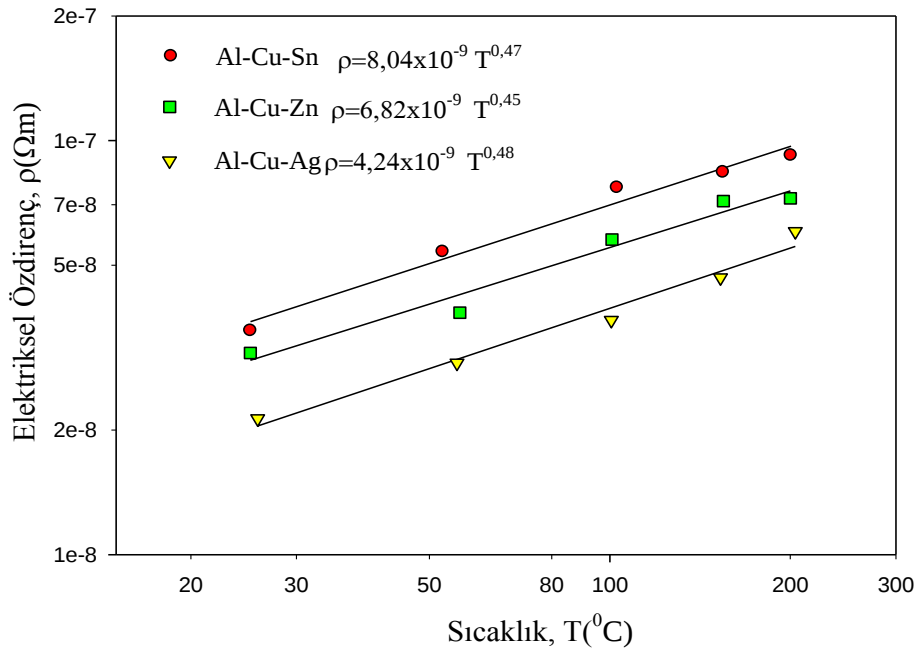
Şekil 3.11. Sıcaklığa bağlı elektriksel özdirenç ve iletkenlik değerlerinin ölçümde kullanılan (a) Güç kaynağı ve multimetreler, (b) Kül fırını

Döküm fazındaki Al-Cu-Ag, Al-Cu-Sn ve Al-Cu-Zn alaşımlarına ait numunelerin elektriksel özdirenç değerleri ölçülmüştür. Ölçüm sonuçları Tablo 3.1’de verilmiştir. Özdirencin (ρ) sıcaklığında katkı malzemelerine göre değişimi Şekil 3.12 ‘de verilmiştir.



Şekil 3.12. Döküm fazındaki Al-Cu-Ag, Al-Cu-Zn ve Al-Cu-Sn- alaşımları için Elektriksel özdirenç değerleri

Ayrıca döküm fazındaki Al-Cu-Ag, Al-Cu-Sn ve Al-Cu-Zn alaşım sistemlerinin özdirenci, aratan sıcaklığa bağlı olarak değişimi gözlenmiştir. Bu ölçüm, 25-250 °C sıcaklık aralığında belli bir sıcaklık artış hızında yapılmış, elde edilen sonuçlar Şekil 3.13’de verilmiştir. Şekil 13’den de görüldüğü gibi, artan sıcaklıklar elektriksel özdirenç artmaktadır.



Şekil 3.13. Döküm fazındaki Al-Cu-Ag, Al-Cu-Zn ve Al-Cu-Sn- alaşımları için artan sıcaklık ile elektriksel özdirenç değerleri

Tablo 3.2. Al-Cu-Ag Al-Cu-Sn Al-Cu-Zn alaşımlarına ait deneysel ölçüm sonuçları

Alaşımlar	HV (kg/mm ²)	σ (MPa)	ρ (Ω .m)
Al-%33Cu-%2Ag	184,6	92	$2,13 \times 10^{-8}$
Al-%33Cu-%2Zn	136	53,7	$3,07 \times 10^{-8}$
Al-%33Cu-%2Sn	144,2	72,7	$3,47 \times 10^{-8}$

Tablo 3.2 bu proje kapsamında elde edilen deneysel sonuçların değerleri verilmektedir. Tabloda da görüldüğü gibi Al-Cu ötektik alaşımına yapılan katkı malzemeleri ile sertlik değerlerinde, çekme dayanım değerlerinde ve elektriksel özdirenç değerlerinde değişimler olduğu gözlenmiştir. Ölçülen sertlik değerlerine bakıldığında Ag katkılanarak elde edilen numunenin Sn ve Zn katkılanarak elde edilen numunelere göre daha sert olduğu ölçülmüştür. Çekme dayanım ölçüm değerlerine bakıldığında ise Ag katkılanarak elde edilen numunenin Sn ve Zn katkılanarak elde edilen numunelere göre daha yüksek değere sahip olduğu görülmektedir. Elektriksel özdirenç değerlerine bakıldığında ise Sn katkılanarak hazırlanan numunenin Ag ve Zn katkılanarak elde edilen numunelere göre daha yüksek elektriksel özdirence sahip olduğu görülmektedir.

KAYNAKLAR

- 1-PORTER D.A., Easterling K.E., *Phase Transformation in Metals and Alloys*, Van Nostrand and Reinhold, New York (1984) 217-223.
- 2-GÜNDÜZ M., *The Measurement of The Solid-Liquid Energy*, Ph. D Thesis, Oxford University, Oxford, (1984).
- 3-DAVIES G.J., *Solidification And Casting*, John Wiley and Sons, New York., (1973).
- 4-BECKER R., Döring W., Kinetics Behandlung der Keimbildung in Übersättigte Dämpfen, *Annual Physics*, 24, 719, (1953).
- 5-TURNBULL D., Fisher J.C., Rate of Nucleation in Condensed System, *Journal of Chemical Physics*, 17, 71-73, (1949).
- 6-TURNBULL D., Kinetics of Heterogeneous Nucleation, *Journal of Chemical Physics*, 18, 198-203, (1950).
- 7-MIYAZAWA Y., Pound G.M., Homogeneous Nucleation of Crystalline Gallium from Liquid Gallium, *Journal of Crystal Growth*, 23, 45, (1974).
- 8-ROBERT M.B., Robert, B.G., Arthur, P., *Structure and Properties of Alloys*, Mc Graw- Hill, New York, (1965), 68-73.
- 9-BILLIA, B., Trivedi R., *Pattern Formation in Crystal Growth*, Ed.D.T.J. Hurle, Handbook of Crystal Growth, Elsevier Science Publishers B.V.,Amsterdam, Netherlands, (1993) 901-1026.
- 10-EDWARDS L., Endean M., *Manufacturing with Materials* , The Open University Press, (1990) 86-87.
- 11-MASON J.T., Verhoeven J.D., Trivedi R., Primary Dendrite Spacing: I Experimental Studies, *Journal of Crystal Growth*, 59, 516-524, (1982).
- 12-KAYA H., *İkili Ötektik Alaşımların Doğrusal Katılaştırılması ve Mekaniksel Özelliklerinin İncelenmesi*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara, (2001).
- 13-COLLING D.A., *Industrial materials, Metals and Alloys*, Prentice - Hall Inc., Ohio, (1995).
- 14-Kenneth Barbalace <http://klbprouctions.com/>. Periodic Table of Elements - Sorted by Electrical Conductivity. EnvironmentalChemistry.com. 1995-2009. Accessed on line: 8/3/2009
- 15-Caignan A.G., Holt E.M.;New 1,4-dihydropyridine Derivates with Hetero, Saturated B Rings, *Journal of Chemical Crystallography* 32 (2002) 315-323

- 16-Yamashita, M., “Resistivity Correction Factor for the Four-Probe Method”, J.Phys. E: Sci. Instrum., 20 (1987) 1454-1456.
- 17-S. Dutta, V. Shubha, T.G. Ramesh, Florita D’Sa, Thermal and electronic properties of $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$ alloys, Journal of Alloys and Compounds 467 (2009) 305–309
- 18-J. Liang, S. Downes, N. Dariavach, D. Shangguan, and S.M. Heinrich: J. Electron. Mater., 2004, vol. 33, pp. 1507–15.
- 19-JORDAN R. M. and Hunt J. D., The Growth of Lamellar Eutectic Structure in the Pb-Sn and Al-CuAl System, *Metallurgical and Materials Transactions*, 2, 3401-3410, (1971).