



Al-13.6Cu-6Si alaşımının elektriksel ve ısıl özelliklerinin incelenmesi

Investigation of the electrical and thermal properties of Al-13.6Cu-6Si alloy

Erkan Üstün^{1,*}, Mehmet İzzettin Yılmaz², Emin Çadır³

¹ Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Bölümü, 51240, Niğde Türkiye

² Erciyes Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Matematik ve Fen Bilimleri Eğitimi Bölümü, 38280, Kayseri Türkiye

³ Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Fen-Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü, 51240, Niğde Türkiye

Öz

Doğrusal olarak katılaştırılan Al-13.6Cu-6Si alaşımının elektriksel özelliklerinin hem katılaştırma hızına hem de sıcaklığa bağlı olarak nasıl değişim gösterdiği ve buna ek olarak yine aynı alaşımın termal özelliklerinin sıcaklığa göre nasıl bir davranış sergilediği araştırılmıştır. Bu çalışma kapsamında öncelikle alaşımın elektriksel özdirenç (ρ) ölçümleri dört nokta prob yöntemi ile yapılmış ve özdirenç sıcaklık katsayısı (α) hesaplanmıştır. Wiedemann–Franz ve Smith–Palmer denklemleri kullanılarak elde edilen deneysel bulgularla ısıl iletkenlik (K)-sıcaklık (T) arasındaki ilişki belirlenmiştir. 320–953 K sıcaklık aralığında DSC analizi yapılarak çizilen ısı akışı-sıcaklık eğrisinden entalpi (ΔH) ve özısı (c_p) değerlerine ek olarak alaşımın erime sıcaklığı da (T_E) belirlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Elektriksel iletkenlik, Isıl iletkenlik, Erime entalpisi, Özısı

1 Giriş

Günümüz metal/alaşım üretme ve işleme teknolojisinde alüminyum ve alüminyum tabanlı alaşımlar; kolay şekillenmesi, mukavemet özelliği, korozyon direnci, akıcılık, elektriği ve ısıyı iyi iletmesi gibi birçok temel özelliğinin yanı sıra bu özelliklerinin geliştirilebilir ve iyileştirilebilir olması sebebiyle de birçok kullanım alanına (elektrik-elektronik mühendislik uygulamaları başta olmak üzere uzay, otomotiv vb.) sahiptir. Bu yüzden daha üstün özelliklere sahip yeni malzemelerin üretilmesi ve mevcut malzemelerin ise özelliklerinin iyileştirilmesine yönelik olarak birçok çalışmalar yapılmaktadır. Özellikle yüksek elektrik akımı ve ısı taşıma kapasitesi gerektiren uygulamalarda verimlilik kapasitesi yüksek olması bağlamında Al-Cu-Si üçlü alaşımı bu çalışma için tercih edilmiştir. Seçilen Al-13.6Cu-6Si alaşımının elektriksel özelliklerinin hem katılaştırma hızına bağlı olarak hem de yüksek sıcaklıklara maruz kalması durumunda elektriksel ve termal özelliklerinin nasıl değiştiğinin geniş bir sıcaklık aralığında (~300-800K) incelenmesi yapılan bu çalışmayı literatürde yer alan benzer çalışmalardan farklı kılmaktadır (aksi belirtilmedikçe tüm bileşimler ağırlıkça verilmiştir).

İlk olarak sabit sıcaklık gradyanında ($G=4.64$ K/mm) ve farklı katılaştırma hızlarında ($V=8.3-166$ $\mu\text{m/s}$) Bridgman

Abstract

It has been investigated how the electrical properties of the directionally solidified Al-13.6Cu-6Si alloy change depending on both the solidification rate and temperature, and how the thermal properties of the same alloy behave according to the temperature. Within the scope of this study, first of all, the electrical resistivity (ρ) measurements of the alloy were made with the four-point method and the temperature coefficient of the resistivity (α) was calculated. The relationship between thermal conductivity (K) and temperature (T) was determined with the experimental findings obtained using the Wiedemann–Franz and Smith–Palmer equations. In addition to enthalpy of fusion (ΔH) and specific heat (c_p) values, the melting temperature (T_E) of the alloy was determined from the heat flow-temperature curve drawn by performing DSC analysis in the temperature range of 320-953 K.

Keywords: Electrical conductivity, Thermal conductivity, Enthalpy of fusion, Specific heat

tipi fırında doğrusal olarak tek yönlü katılaştırılan Al-Cu-Si ötektik alaşım numunelerinin elektriksel özdirenç ölçümleri dört nokta prob yöntemi ile yapılarak elektriksel özdirenç değerlerinin katılaştırma hızı ile değişimi incelenmiştir. Daha sonra aynı alaşımın elektriksel özdirenç değerlerinin sıcaklığa göre nasıl bir değişim gösterdiği araştırılmıştır. Yine dört nokta prob yöntemi kullanılarak alaşımın özdirenç ölçümleri yapılmış ve özdirenç sıcaklık katsayısı (α) hesaplanmıştır. Daha sonra Wiedemann–Franz [1] ve Smith–Palmer [2] denklemleri yardımıyla elde edilen deneysel verilerle termal iletkenlik (K) - sıcaklık (T) arasındaki ilişki tespit edilmiştir. Son olarak DSC analiziyle de alaşımımızın katı-sıvı dönüşümü esnasındaki erime sıcaklığı (T_E), erime entalpisi (ΔH) ve özısı (c_p) değerleri belirlenmiştir.

2 Deneysel yöntem

2.1 Numune hazırlama ve katılaştırma

Al-13.6Cu-6Si üçlü alaşımı %99.99 saflıktaki metaller kullanılarak vakumlu eritme fırınında eritilmiş, tam bir homojen karışım elde etmek için karıştırılmış ve akıcılığı oldukça iyi olan sıvı alaşım elde edilmiştir. Daha sonra bu eriyik alaşım, alttan su soğutmalı döküm fırınında bulunan saflığı yüksek grafit potalarının içerisine dökülerek numune içinde hiçbir hava boşluğu kalmayacak şekilde serbest

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: erkanustun_07@hotmail.com (E. Üstün)

Geliş / Received: 06.07.2023 Kabul / Accepted: 26.10.2023 Yayımlanma / Published: 15.01.2024

doi: 10.28948/ngumuh.1323640

formda doğrusal olarak tek yönlü katılaştırılarak üretim işlemi tamamlanmıştır. Üretilen bu numunelerin doğrusal katılaştırma işlemleri Bridgman tipi bir fırında (Şekil 1), sabit bir G'de (4.64 K/mm) farklı V (8.3-166 µm/s) değerlerinde gerçekleştirilmiştir. Alaşım numunelerinin üretilmesi ve doğrusal katılaştırma işlemleri ile ilgili detaylı bilgiler başka bir çalışmada [3] verilmiştir.

2.2 Elektriksel özdirenç değerlerinin ölçülmesi

2.2.1 Katılaştırma hızına bağlı olarak özdirenç ölçümü

Şekil 1'de görülen deney sisteminde kontrollü olarak sabit sıcaklık gradyanında (G) ve farklı katılaştırma hızlarında (V) tek yönlü doğrusal katılaştırma işlemleri tamamlanan 4 mm çapında 200 mm uzunluğundaki numunelerden, dendritik yapıyı içerecek şekilde yarım silindirik kesitli 10 mm uzunluğunda yüzey kusuru ve döküm boşluğu içermeyecek şekilde özdirenç ölçümü için numuneler hazırlanmıştır. Hazırlanan numunelerin elektriksel özdirenç değerleri (ρ) dört nokta prob (four-point probe) yöntemi kullanılarak oda sıcaklığında ölçülmüştür. Bu yöntem numune üzerine 4 adet platin telin (0.5 mm çapında) bağlanarak verilen akıma karşı ortaya çıkan voltaj değerinin ölçülerek elektriksel özdirenç değerinin belirlenmesi esasına dayanır. Elektriksel özdirenç değeri (ρ);

$$\rho = 2\pi s \left(\frac{U}{I} \right) \quad (1)$$

ifadesiyle verilir. Burada $2\pi s$, numunenin geometrisine bağlı olan bir düzeltme faktörünü, s , problemin numune üzerindeki temas noktaları arasındaki mesafeyi (~2mm), U,

iç problemler arasındaki potansiyel farkını ve I, dış problemlerden geçen akımı ifade etmektedir. Bu yöntemin kullanım şekli ve ölçümü ile ilgili daha ayrıntılı bilgiler kaynak [4]'de verilmiştir.

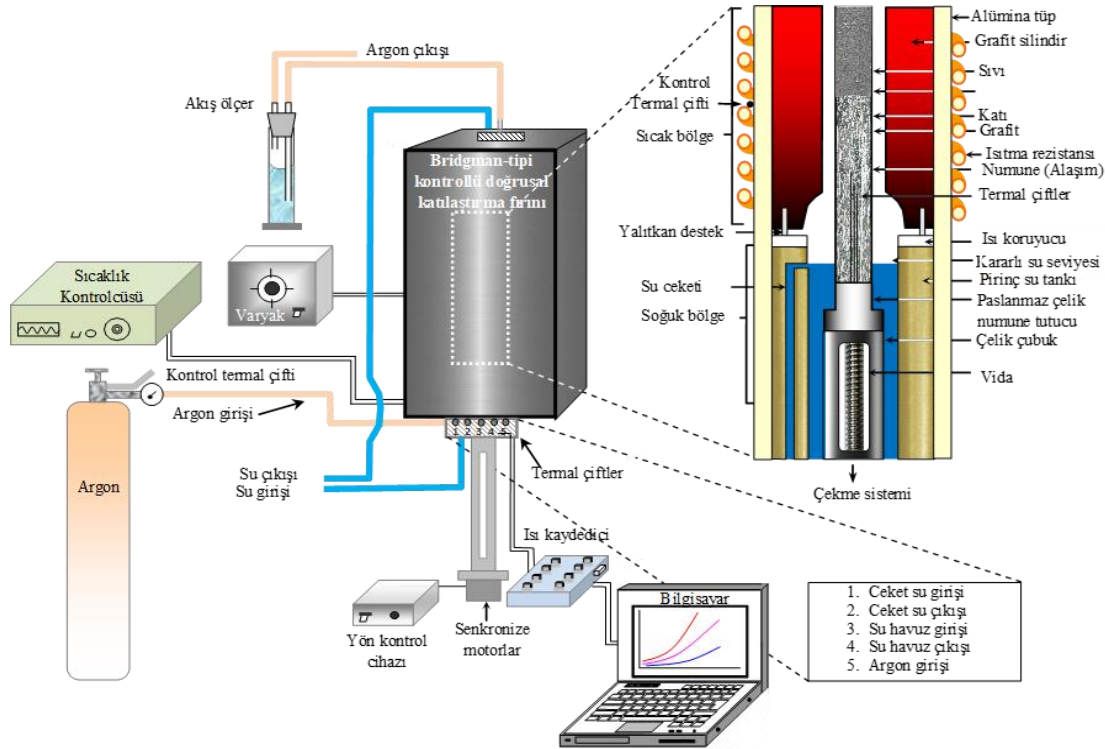
Her bir katılaştırma hızında katılaştırılan numunelerin elektriksel özdirenç değerinin hassas bir şekilde belirlenmesi için aynı numune üzerinden yaklaşık 50 ölçüm yapılarak ortalama değer alınmış ve bu sayede sonucun güvenilirliği artırılmıştır.

2.2.2 Sıcaklığa bağlı olarak özdirenç ölçümü

Seçilen bir döküm numunesinin elektriksel özdirençinin sıcaklıkla değişimi oda sıcaklığı ile 791 K aralığında ölçülmüştür. Numunenin oda sıcaklığından 791 K değerine kadar ısıtılması ve sıcaklık kontrolü Nabertherm P320 kül fırını kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ölçüm yapılacak numune yine katılaştırma hızına bağlı özdirenç ölçümündeki gibi yarım silindirik kesitli 10 mm uzunluklu parlatılmış yüzey kusuru ve döküm boşluğu içermeyecek şekilde hazırlanmıştır. Numune boyutları, 10 µm'lik bir hassasiyete sahip bir dijital mikrometre kullanılarak ölçülmüştür. Elektriksel özdirenç sıcaklığa oldukça bağlıdır. Metallerde, elektrik özdirenç artan sıcaklıkla artar. Özdirenç sıcaklık katsayısı genellikle elektrik özdirençinin sıcaklık grafiğine karşı eğimi olarak ifade edilir ve şu şekilde verilebilir;

$$\alpha = \frac{\rho - \rho_0}{\rho_0(T - T_0)} = \frac{1}{\rho_0} \frac{\Delta\rho}{\Delta T} \quad (2)$$

burada ρ , T sıcaklığındaki özdirenç, ρ_0 , oda sıcaklığındaki T_0 (300 K) özdirenç ifade etmektedir.



Şekil 1. Bridgman-tipi doğrusal katılaştırma deney sistemi

2.3 Isıl iletkenlik değerlerinin tespiti

Bir malzemenin ısı iletkenliği (K), malzemenin ısı iletme kabiliyetiyle ifade edilir. Malzemenin yapısına ve sıcaklığına bağlı olarak malzemenin K değeri belirlenir. Isıl iletkenlik ile elektriksel iletkenlik arasındaki ilişki, hem ısı hem de elektriksel iletimin metal içerisindeki serbest elektronlar tarafından sağlandığı gerçeğine dayanan Wiedemann-Franz denklemiyle [1] ve Smith-Palmer denklemiyle [2] açıklanmıştır. Smith-Palmer denklemi (Denklem 4) Wiedemann-Franz denkleminin (Denklem 3) modifiye edilmiş halidir.

$$\frac{K}{\sigma} = LT \quad (3)$$

$$K = 0.909L\sigma T + 10.5 \quad (4)$$

burada K, ısı iletkenlik, σ , elektriksel iletkenlik ve L, Lorenz sayısıdır. Lorenz sayısının teorik değeri $2.45 \times 10^{-8} \text{ W}\Omega/\text{K}^2$ 'dir. Ancak Lorenz sayısının tüm malzemeler için aynı değerde olmadığı ve sıcaklığa bağlı değişim oranının çok az olduğu belirtilmiştir [5]. Isıl iletkenliğin sıcaklığa bağlı değişimi σ ve L değerleri kullanılarak belirlenmiştir.

2.4 Erime noktası, erime entalpisi ve özısı niceliklerinin tayini

Alaşım numunesine ait erime noktası (T_E), erime entalpisi (ΔH) ve özısı (c_p) değerleri diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC) cihazı (Netzsch STA 449 C Jupiter balance) yardımıyla ölçülmüştür. DSC eğrileri kullanılarak aşağıdaki denklemin kullanılmasıyla numunelerin T_E , ΔH ve c_p değerleri tespit edilmiştir.

$$mc_p \frac{dT}{dt} = \frac{dQ}{dt} \quad (5)$$

Burada, dT/dt , ısıtma hızı (K/s), dQ/dt , ısı akış hızı, (J/s veya watt), m, kullanılan numunenin kütlesi ve Area=üçgenin alanı = 0.5 taban x yükseklik = 0.5 zaman x güç (numunenin erimesi için gerekli enerji) ile verilir. Bu ölçüm ve hesaplamalardaki hata payı yaklaşık olarak %5 olarak belirlenmiştir.

3 Bulgular ve tartışma

3.1 Katılaştırma hızının ve sıcaklığın elektriksel özdirenç üzerindeki etkisi

Sabit G'de farklı V'de numunelerin elektriksel özdirenç değerleri dört nokta prob yöntemiyle Tablo 1'deki gibi katılaştırma parametrelerine bağlı olarak elektriksel özdirenç değerleri belirlenmiştir.

Şekil 2'de, elektriksel özdirenç değerlerinin artan katılaştırma hızlarına bağlı olarak değişimi gösterilmektedir. Elektriksel özdirenç (ρ) katılaştırma hızına (V) bağımlılığı;

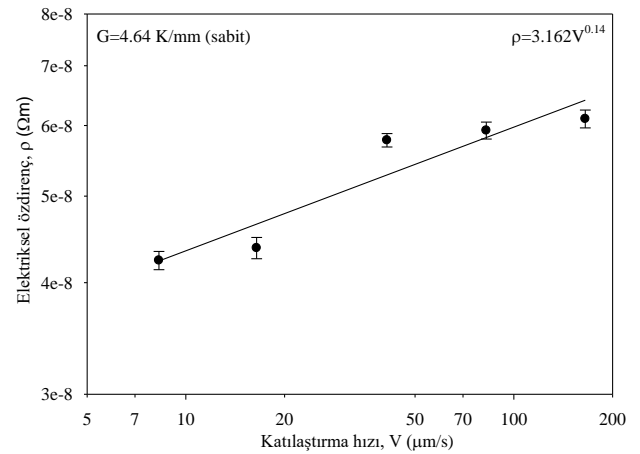
$$\rho = kV^a \quad (6)$$

denklemleri ile ifade edilmektedir. Burada k, bir sabittir, a, katılaştırma hızına ilişkin üstel değerdir. Şekil 2 ve Tablo 1'de görüldüğü gibi, lineer regresyon analizi kullanılarak ρ ve V arasındaki ilişki $\rho = 3.162V^{0.14}$ olarak bulunmuştur. Sabit sıcaklık gradyentinde ($G=4.64 \text{ K/mm}$) artan katılaştırma hızı ($8.3-166 \mu\text{m/s}$) ile elektriksel özdirenç değerlerinin 4.24×10^{-8} 'den $6.10 \times 10^{-8} \Omega\text{m}$ 'ye arttığı görülmüştür. Standart sapma değerinin yaklaşık % 5 olduğu belirlenmiştir.

Tablo 1. Al-Cu-Si alaşımı için sabit G'de farklı V'de elektriksel özdirenç değerleri

Katılaştırma Parametreleri		Elektriksel Özdirenç Değerleri
G (K/mm)	V ($\mu\text{m/s}$)	$\rho \times 10^{-8}$ (Ωm)
4.64	8.3	4.24
	17.4	4.38
	41.5	5.78
	83.0	5.92
	166.0	6.10

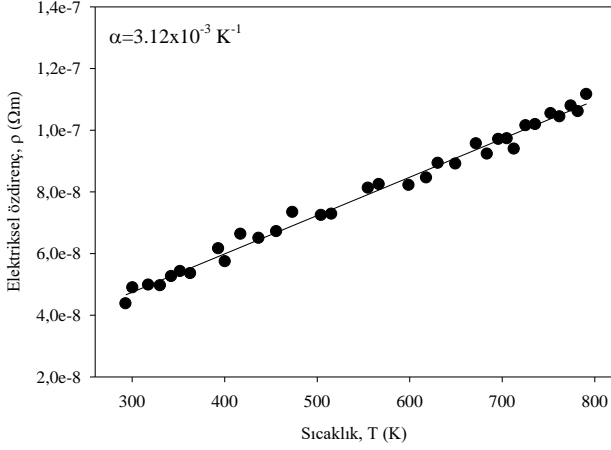
ρ için bu çalışmada bulunan V'nin üstel değeri (0.14), Kaya vd. [6] tarafından (Al-7Ni alaşımı için), Büyük [7] tarafından (Al-11.1Si-4.2Ni alaşımı için) ve Kaya vd. [8] tarafından (Al-1.94Mn-5Si alaşımı için) elde edilen sırasıyla 0.08, 0.09 ve 0.08 üstel değerlerinden biraz büyük çıkmıştır. Bu farklılıklar, alaşım elementlerindeki farklılıktan ve farklı koşullar altında numune hazırlamadan kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 2. Al-Cu-Si alaşımı için elektriksel özdirenç değerlerinin katılaştırma hızı ile değişimi.

Şekil 3'de ise, elektriksel özdirenç değerlerinin sıcaklıkla değişimi verilmiştir. Artan sıcaklık değerleri (300–791 K) ile elektriksel özdirenç değerlerinin 4.37×10^{-8} 'den $1.12 \times 10^{-7} \Omega\text{m}$ 'ye arttığı görülmüştür. Buradan da görüleceği üzere elektriksel özdirenç değeri üzerinde, sıcaklığın etkisi katılaştırma hızına göre çok daha fazladır. Ayrıca; 1 K'lık sıcaklık artışında 1 Ω 'luk iletken direncinde oluşan artma miktarı olarak tanımlanan elektriksel özdirenç sıcaklık değişim katsayısı (α), elektriksel özdirenç-sıcaklık (ρ -T)

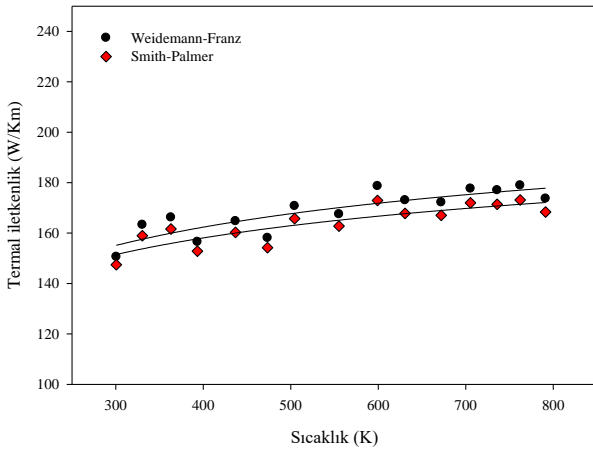
grafîğinden ve Denklem 2'den yararlanılarak $3.12 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ olarak hesaplanmıştır. Bizim bulduğumuz bu α değerini, benzer koşullar altında Büyük ve ark. [9] (Zn-1.5Cu alaşımı için) $4.95 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ olarak bulmuşlardır.



Şekil 3. Al-Cu-Si alaşımı için elektriksel özdirenç değerlerinin sıcaklık ile değişimi

3.2 Sıcaklığın termal iletkenlik üzerindeki etkisi

Al-Cu-Si alaşımının ısı iletkenliğinin (K) sıcaklıkla (T) değişimi, elektriksel iletkenlik (σ) ve Lorenz (L) değerleri kullanılarak Wiedemann–Franz [1] ve Smith–Palmer [2] denklemleriyle belirlenmiştir. 300–791 K sıcaklık aralığında belirlenen bu ısı iletkenlik değerleri ayrı ayrı her iki denklem kullanılarak hesaplanmış ve Tablo 2'de verilmiştir. Şekil 4'de ise ısı iletkenliğinin sıcaklığa bağlı değişimi gösterilmiştir.



Şekil 4. Al-Cu-Si alaşımı için termal iletkenlik değerlerinin sıcaklık ile değişimi

Aynı sıcaklık aralığında Wiedemann–Franz denklemi kullanılarak elde edilen ısı iletkenlik değerleri (150.63–173.67 W/Km), Smith–Palmer denklemi kullanılarak elde edilen ısı iletkenlik değerlerinden (147.42–168.37 W/Km) az da olsa büyük çıkmıştır. Ayrıca Weidemann–Franz ve Smith–Palmer denklemleri kullanılarak belirlenen ısı iletkenlik değerleri sıcaklık değişimlerine bağlı olarak az da

olsa bir artış eğiliminde olduğu Şekil 4'de verilen değişim grafîğinde gösterilmektedir.

Bu farklılıklar, alaşım elementlerindeki farklılıktan ve farklı koşullar altında numune hazırlamadan olabileceği gibi elektron-elektron etkileşiminden de kaynaklanıyor olabilir.

Tablo 2. Al-13.6Cu-6Si alaşımı için elde edilen termal iletkenlik değerleri

T (K)	Deneysel Değerler		Termal İletkenlikler	
	ρ $\times 10^{-8}$ (Ωm)	σ $\times 10^{+7}$ (Ωm) ⁻¹	Weidemann -Franz (W/Km)	Smith-Palmer (W/Km)
300.62	4.89	2.05	150.63	147.42
330.42	4.96	2.02	163.30	158.94
363.10	5.35	1.87	166.25	161.62
393.37	6.16	1.62	156.55	152.80
436.91	6.50	1.54	164.75	160.26
473.43	7.34	1.36	158.09	154.21
504.42	7.24	1.38	170.76	165.72
555.15	8.12	1.23	167.49	162.75
599.12	8.21	1.22	178.69	172.93
630.62	8.93	1.12	173.03	167.79
671.93	9.56	1.05	172.19	167.02
705.29	9.72	1.03	177.68	172.01
735.83	10.18	0.98	177.02	171.41
762.11	10.44	0.96	178.93	173.15
791.17	11.16	0.90	173.67	168.37

3.3 Al-Cu-Si alaşımının DSC analizi

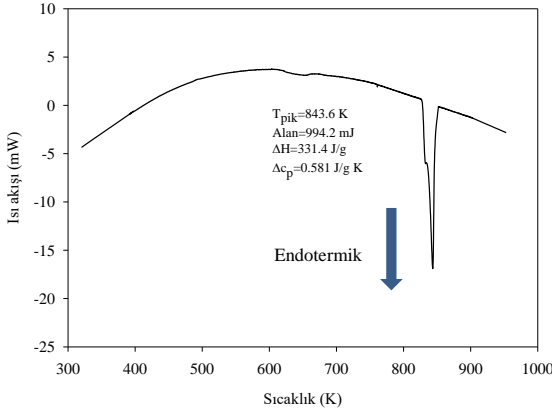
DSC deneylerinden elde edilen ve Şekil 5'te verilen sıcaklık-ısı akışı grafîği malzemeler hakkında önemli bilgiler sunmaktadır. Al–13.6Cu–6Si alaşımının termal özellikleri, DSC analizi ile 320–953 K sıcaklık aralığında 10 K/dak ısıtma hızı kullanılarak yapılmıştır. Birim kütle erimesi için gerekli olan enerji değeri, Entalpi (ΔH),

$$\Delta H = \text{Alan (m)} / \text{kütle (mg)} \quad (7)$$

ifadesiyle hesaplanmıştır. Burada Alan (Area), oluşan pikin sınırladığı alandır ve kütle ise cihazın içine yerleştirilen numunenin mg cinsinden değeridir (~3 mg).

Şekil 5'deki DSC eğrisinin ilk bükümün oluşmasıyla erime süreci başlamış keskin pik noktasında ise tam erime gerçekleşmiştir. Al–13.6Cu–6Si alaşımının erime sıcaklığı (T_E) 843.6 K, erime entalpisi (ΔH) 331.4 J/g ve özısı (c_p) 0.581 J/gK olarak tespit edilmiştir.

Benzer koşullarda Büyük [7] tarafından (Al-11.1Si-4.2Ni alaşımı için) $T_E=837.73 \text{ K}$, $\Delta H=411.03 \text{ J/g}$ ve $\Delta c_p=0.716 \text{ J/(gK)}$ değerleri, Kaya vd. [8] tarafından (Al-1.94Mn-0.5Si alaşımı için) $T_E=944.7 \text{ K}$, $\Delta H=185.5 \text{ J/g}$ ve $\Delta c_p=0.276 \text{ J/(gK)}$ değerleri, Büyük [9] tarafından (Zn-1.5Cu alaşımı için) $T_E=699.47 \text{ K}$, $\Delta H=156.94 \text{ J/g}$ ve $\Delta c_p=0.368 \text{ J/(gK)}$ değerleri elde edilmiştir.



Şekil 5. Al-Cu-Si alaşımına ait ısı akışı-sıcaklık eğrisi

4 Sonuçlar

Al-13.6Cu-6Si alaşımının elektriksel ve ısıl özellikleri incelenmiş ve sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

1. Sabit G'de (4.64 K/ μm) artan V'de (8.3-166 $\mu\text{m/s}$) ρ değerleri 4.24×10^{-8} 'den 6.10×10^{-8} Ωm değerine kadar artmıştır.
2. Sıcaklığın 300 K'den 791 K'e artmasıyla ρ değerleri 4.37×10^{-8} 'den 1.12×10^{-7} Ωm değerine kadar artmıştır.
3. α değeri, 3.12×10^{-3} K^{-1} olarak tespit edilmiştir.
4. Sıcaklığın 300 K değerinden 791 K değerine artırılmasıyla, Wiedemann-Franz denklemi yardımıyla ısıl iletkenlik değerleri 150.63–173.67 W/Km aralığında, Smith-Palmer denklemi yardımıyla ısıl iletkenlik değerleri 147.42–168.37 W/Km aralığında bir artış göstermiştir.
5. Al-13.6Cu-6Si alaşımına ait elde edilen DSC eğrisinden alaşımın erime sıcaklığı (T_E) 843.6 K, ΔH değeri 331.4 J/g ve c_p değeri 0.581 J/gK olarak hesaplanmıştır.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %17

Kaynaklar

- [1] C. Kittel, Introduction to Solid State Physics, 6th. Ed., Wiley, New York, 1965.

- [2] D.R. Poirier and G. H. Geiger, Transport Phenomena in Materials Processing, The Minerals, Metals & Materials Society, Warrendale, PA, 1994.
- [3] E. Üstün and E. Çadırılı, Investigation of the microstructure and physical properties of directionally solidified ternary Al-8.8La-1.2Ni alloy. Journal of Alloys and Compounds, 855, 157731, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.157331>.
- [4] E. Çadırılı, M. Sahin, R. Kayalı, M. Arı, S. Durmuş, Dependence of electrical and thermal conductivity on temperature in directionally solidified Sn-3.5 wt% Ag eutectic alloy. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 22, 1709–1714, 2011. <https://doi.org/10.1007/s10854-011-0350-9>.
- [5] G.S. Kumar, G. Prasad and R.O. Pohl, Experimental determinations of the Lorenz number, Journal of Materials Science, 28, 4261–4272, 1993. <https://doi.org/10.1007/BF01154931>.
- [6] H. Kaya, U. Büyük, Çadırılı, E. and N. Maraşlı, Influence of growth rate on microstructure, microhardness, and electrical resistivity of directionally solidified Al-7 wt% Ni hypo-eutectic alloy. Metals and Materials International, 19(1), 39-44, 2013. <https://doi.org/10.1007/s12540-013-1007-4>.
- [7] U. Büyük, Physical and mechanical properties of Al-Si-Ni eutectic alloy. Metals and Materials International, 18(6), 933–938, 2012. <https://doi.org/10.1007/s12540-012-6004-5>.
- [8] H. Kaya, E. Çadırılı and U. Büyük, Microstructure, microhardness, tensile, electrical, and thermal properties of the Al-Mn-xSi ternary alloys, Kavove Materialy Metallic Materials, 58(4), 275-285, 2020 https://doi.org/10.4149/km_2020_4_275.
- [9] U. Büyük, H. Kaya, E. Çadırılı, N. Maraşlı, A. Ülgen, Investigation of the effect of solidification processing parameters on microhardness and determination of thermo-physical properties in the Zn-Cu peritectic alloy, Journal of Alloys and Compounds, 491(1-2), 143–148, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2009.10.184>.

