



Al-Cu-Si üçlü alaşımının mikroyapısının ve mikrosertliğinin katılaştırma hızına ve sıcaklık gradyentine bağlı olarak değişimi

The variation of microstructure and microhardness of Al-Cu-Si ternary alloy depending on solidification rate and temperature gradient

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

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

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

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

Öz

Al-13.6Cu-6Si (%ağ.) üçlü alaşımı sabit bir katılaştırma hızında ($V=17.4 \mu\text{m/s}$), farklı sıcaklık gradyentlerinde (1.6-6.12 K/mm) ve sabit bir sıcaklık gradyentinde ($G=4.64 \text{ K/mm}$) farklı katılaştırma hızlarında (8.3-166.0 $\mu\text{m/s}$) Bridgman tipi doğrusal katılaştırma fırını içerisinde tek yönlü olarak doğrusal bir şekilde katılaştırılmıştır. Katılaştırma işlemi tamamlanan alaşım numuneleri metalografik işlemlere tabi tutularak mikroyapıları açığa çıkartılmıştır. Mikroyapı parametreleri (λ_1 ve λ_2) üzerine katılaştırma parametrelerinin (V ve G) etkisi incelenmiştir. Ayrıca mikrosertliğin katılaştırma hızına, sıcaklık gradyentine ve mikroyapı parametrelerine bağımlılığı araştırılmıştır. Bunun yanı sıra elde edilen sonuçlar literatürde yer alan benzer deneysel sonuçlarla kıyaslanmıştır.

Anahtar kelimeler: Üçlü alaşımlar, Doğrusal katılaştırma, Mikroyapı, Mikrosertlik

1 Giriş

İnsanoğlu, tarih boyunca daha iyi ve daha yaşanabilir bir gelecek için bilimi merkeze almıştır ve bu bilimin öncülüğünde birçok yeni teknoloji geliştirilmiştir. Uzay, uçak, otomotiv ve yapay zekâ gibi alanlarda çalışmalar yapılmıştır. Günümüz teknolojisi, hızla gelişmekte ve bu gelişimin devam edebilmesi için malzeme bilimi büyük bir öneme sahiptir. Alüminyum, bakır, gümüş ve silisyum gibi malzemeler, günümüz teknolojinin temelini oluşturmaktadır. Ancak, daha üstün özelliklere sahip malzemelerin geliştirilmesi için uzun yıllardır araştırmalar yapılmaktadır. Bu araştırmalar sayesinde yeni malzemelerin geliştirilmesi ve mevcut malzemelerin özelliklerinin iyileştirilmesi mümkün hale gelmiştir.

Alüminyum ve alüminyum tabanlı alaşımlar, birçok temel özelliğinin yanı sıra kolay şekillenmesi, mukavemeti, korzyon direnci, elektrik ve ısı iletkenliği gibi özellikleri sebebiyle önemli birçok kullanım alanına sahiptir. Malzemelerin mikroyapısını kontrol ederek, malzemenin üretim ve işleme aşamasında ortaya çıkabilecek mikroyapısal hataları minimum düzeye getirmek, yeni malzemelerin en iyi performansını göstermesi için çok

Abstract

The Al-13.6Cu-6Si (wt.%) ternary alloy was solidified upward unidirectional directionally in a Bridgman-type directional solidification furnace at a constant solidification rate ($V=17.4 \mu\text{m/s}$), different temperature gradients (1.6-6.12 K/mm), and different solidification rates (8.3-166.0 $\mu\text{m/s}$) at a constant temperature gradient ($G=4.64 \text{ K/mm}$). After completion of the solidification process, the alloy samples were subjected to metallographic treatments to reveal their microstructures. The effect of solidification parameters (V and G) on microstructure parameters (λ_1 and λ_2) was examined. In addition, the dependence of microhardness on solidification rate, temperature gradient, and microstructure parameters was investigated. The results were also compared with similar experimental results reported in the literature.

Keywords: Ternary alloys, Directional solidification, Microstructure, Microhardness

önemli bir faktördür. Bu nedenle, en güvenilir işlem "Doğrusal Katılaştırma" olarak kabul edilir. Doğrusal katılaştırma yönteminde, alaşım bileşimi (Co), katılaştırma hızı (V) ve sıcaklık gradyenti (G) gibi katılaştırma parametreleri, mikroyapıyı ve mekanik özellikleri doğrudan etkiler [1-3]. Al-Cu-Si üçlü alaşımları ticari açıdan çok önemli bir alaşım olmasına rağmen katılaştırma parametrelerinin bu alaşımın mikroyapısını ve mikrosertliğini ne ölçüde etkilediği hakkındaki bilgiler literatürde çok sınırlıdır. Bu yüzden bu çalışmada Al-13.6Cu-6Si (%ağ.) üçlü alaşımı tercih edilmiştir.

Bu çalışmada, Bridgman tipi doğrusal katılaştırma yöntemi kullanılarak G ve V parametreleri birbirlerini etkilemeden kontrol edilerek, alaşım numunelerinin doğrusal bir şekilde katılaştırılması sağlanmıştır. Bu yöntemle alaşım numuneleri önce sabit bir V değeri için farklı G değerlerinde sonra sabit bir G değeri için farklı V değerlerinde katılaştırılmıştır. Katılaştırma parametreleri olan V ve G değerlerinin malzemelerin mikroyapı parametreleri (λ_1 , λ_2) ve mekanik özelliklerden mikrosertlik (HV) üzerine etkileri ve ayrıca mikrosertliğin, mikroyapı parametrelerine bağımlılığı araştırılmıştır. Bunun yanı sıra yapılan

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

Geliş / Received: 11.04.2023 Kabul / Accepted: 24.05.2023 Yayınlanma / Published: 15.07.2023

doi: 10.28948/ngumuh.1280809

çalışmalardan elde edilen veriler daha önce yapılan benzer çalışmalarla kıyaslanmıştır.

2 Deneysel süreç

2.1 Numunelerin hazırlanması

Özellikleri incelenmek istenen üçlü Al-13.6Cu-6Si (%ağ.) alaşımı, yüksek saflıktaki (%99.99) Al, Si ve Cu metallerinin ağırlık oranları belirlendikten sonra ilk olarak vakum eritme fırınında eritilmiş ve homojen hale getirilmiştir. Daha sonra eriyik alaşım döküm fırını içinde bulunan grafit potaların içerisine dökülerek numune kalıpları hazırlanmıştır. Bu süreç içinde döküm boşluğunun oluşmaması için azami özen gösterilmiştir. Bu çalışmada Bridgman-tipi doğrusal katılaştırma deney sistemi (Şekil 1) kullanılarak üretilen numunelerin tek yönlü doğrusal katılaştırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Alaşım numunelerinin üretilmesiyle ilgili birçok teknik bilgi kaynaklar [2]'de ayrıntılarıyla açıklanmıştır.

2.2 G ve V parametrelerinin belirlenmesi

Numunenin doğrusal katılaştırma sürecine başlamadan önce farklı G ve V değerleri elde edebilmek için ilk olarak numune içerisine 5 mm aralıklarla çapı 0.5 mm olan K-tipi üç adet termal çift sabitlenmiştir. Daha sonra sürücü sistem içinde numunenin pozisyonu ve Bridgman tipi fırının sıcaklığı istenilen değere ayarlanmıştır. Son olarak Bridgman tipi fırının kararlı denge durumuna gelmesi beklenerek farklı hızlardaki motorlar yardımıyla katılaştırma

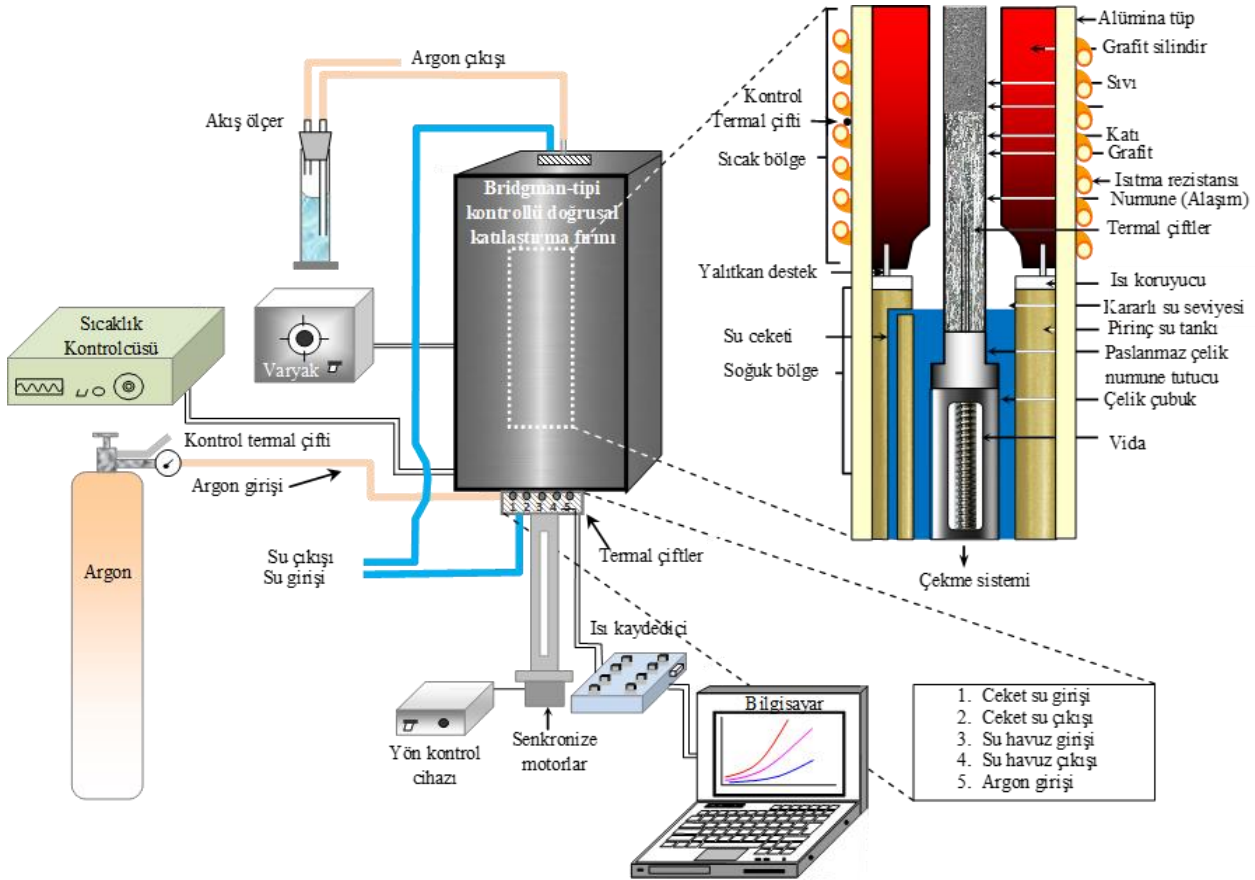
süreçlerine başlanmıştır. Bu süreçlerde termal çiftler yardımıyla numunelerin sıvı fazın sıcaklık gradyentleri ($G=\Delta T/\Delta X$) ve katı-sıvı arayüzeyinin katılaştırma hızları ($V=\Delta X/\Delta t$) tespit edilmiştir. Burada; ΔT , termal çiftler arasındaki sıcaklık farkını, ΔX , termal çiftler arası mesafeyi ve Δt ise katı-sıvı arayüzeyinin iki termal çift arasındaki mesafeyi alması için gereken süreyi ifade etmektedir.

2.3 λ_1 ve λ_2 dendrit kol mesafelerinin hesaplanması

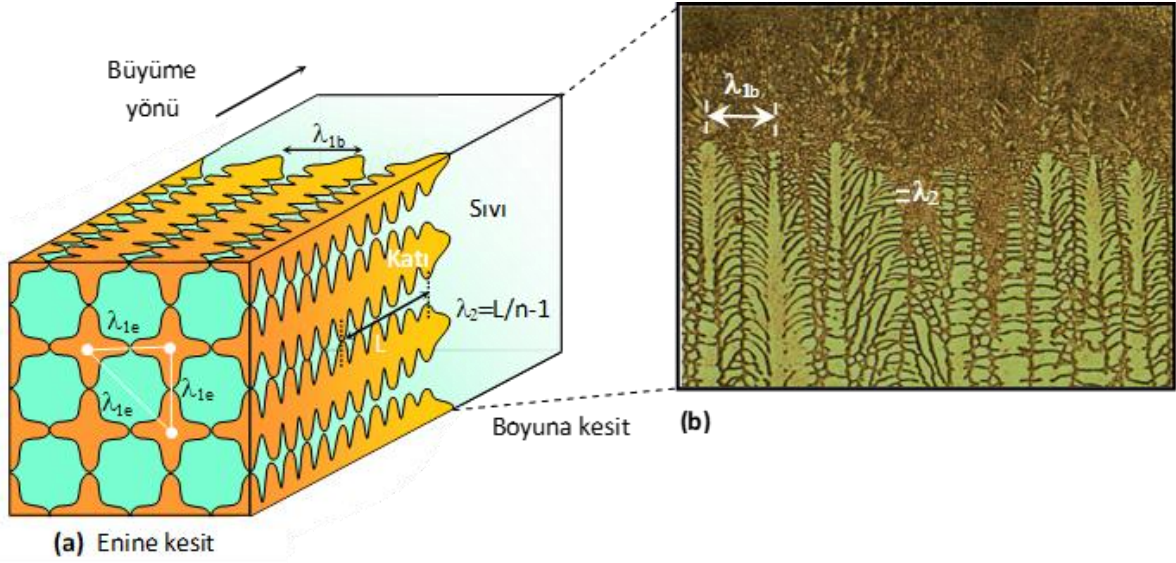
Dendrit kol mesafelerini ölçmek için numunenin boyuna kesitinde Şekil 2'de gösterildiği gibi doğrusal kesişim metodu [3] kullanılmıştır. Bu metod kullanılarak birincil dendrit kol mesafesinin (λ_1) yanı sıra ikincil dendrit kol mesafesi de (λ_2) ölçülmüştür. Adobe Photoshop CS3 programı yardımıyla Olympus BX-51 tipi optik mikroskobundan her bir numune için ayrı ayrı çekilen fotoğraflar üzerinden ölçüm güvenilirliğini artırmak için ortalama 25-30 adet λ_1 ve λ_2 değeri ölçüldü ve yapılan tüm ölçümlerin aritmetik ortalamaları hesaplanarak λ_1 ve λ_2 değeri belirlenmiştir.

2.4 Mikrosertlik ölçümü (HV)

Bu çalışmada katılaştırma parametreleri olarak adlandırılan V ve G'nin mikrosertlik (HV) üzerine de etkisi ve dolayısıyla mikrosertliğin mikroyapı parametrelerine bağımlılığı da araştırılmıştır. Numunelerin mikrosertlik değerleri, Future-Tech FM-700 Model mikrosertlik test ölçüm cihazına sırasıyla yerleştirilen numuneler üzerine 25



Şekil 1. Bridgman-tipi doğrusal katılaştırma deney sistemi



Şekil 2. Dendritik kol mesafe ölçümlerinin şematik gösterimi: (a) boyuna ve enine kesitlerin gösterimi, (b) boyuna kesitte λ_1 ve λ_2 ölçümler

gr'lık yüklerin 10 s boyunca uygulanması ve devamında numune üzerinde ortaya çıkan izlerin Vickers sertlik ölçme yöntemiyle [4] hesaplanmasıyla belirlenmiştir. Bu hesaplamalar hem sabit G farklı V değerlerinde hem de sabit V farklı G değerlerinde üretilen numunelerin enine ve boyuna kesitinden yapılmıştır. Sonuçların istatistiksel güvenilirliğini ve tekrarlanabilirliğini artırmak için her numuneden en az 15–20 ölçüm yapılarak istatistiksel hesaplamalar gerçekleştirilmiştir.

3 Bulgular ve tartışma

3.1 Fazların ve bileşimlerin karakterizasyonu

Al-13.6Cu-6Si alaşımının faz ve bileşim analizini yapmak için numunenin seçilmiş alanları için EDX analizi yapılmış ve SEM görüntüleri çekilmiştir. Elde edilen SEM/EDX veri ve görüntülerinden beyaz faz (ara faz), gri faz (Al zengin ana faz) ve siyah faz (α -Al fazı) olmak üzere üç farklı fazın oluştuğu tespit edilmiş ve her bir fazın kimyasal bileşim analizleri yapılmıştır.

Şekil 3'de Al-13.6Cu-6Si alaşımına ait EDX analiz sonuçlarına göre; beyaz faz olarak belirtilen ara fazın ağırlıkça 66.67Cu-33.33Si, gri faz olarak belirtilen Al-zengin ana fazın 70.05Al-21.38Cu-8.57Si ve siyah faz olarak belirtilen α -Al fazın 93.56Al-4.75Cu-1.69Si bileşimine sahip olduğu tespit edilmiştir.

3.2 λ_1 'in G ve V'ye bağlılığı

Farklı katılaştırma parametrelerinde (sabit G=4.64 K/mm, farklı V=8.3-83 $\mu\text{m/s}$ ve sabit V=17.4 $\mu\text{m/s}$ farklı G=1.60-4.64 K/mm) tek yönlü doğrusal katılaştırma fırınında üretilen numunelerin her birinden optik mikroskop yardımıyla çok sayıda fotoğraf çekilmiştir. Ayrıca fazların ortaya çıkarılabilmesi için de SEM mikroskobu kullanılmıştır. Şekil 4 ve Şekil 5'de farklı katılaştırma şartlarına sahip Al-13.6Cu-6Si alaşımına ait optik mikroskopla çekilen mikroyapı fotoğraflarından bazıları verilmiştir. Bu fotoğraflardan da görüleceği üzere hem sabit

G artan V'de hem de sabit V artan G'de mikroyapıların ince dendritik morfolojiye dönüştüğü gözlenmiştir.

Tablo 1'de Al-13.6Cu-6Si dendritik alaşımımıza ait farklı katılaştırma parametrelerinden üretilmiş olan numunelerden ölçülen birincil (λ_1) - ikincil dendrit (λ_2) kollar arası mesafeler ve mikrosertlik (HV) ölçüm sonuçları verilmiştir. Bu ölçüm sonuçlarından da anlaşılacağı üzere artan V değerlerine bağlı olarak (sabit G'de) λ_1 değeri 448.06 μm 'den 224.0 μm 'ye ($\cong 2$ kat), λ_2 değeri 44.76 μm 'den 17.95 μm 'ye ($\cong 2.5$ kat) azalırken, HV_b değeri 66.55 kg/mm²'den 76.27 kg/mm²'e ($\cong 1.1$ kat) ve HV_e değeri 68.73 kg/mm²'den 78.65 kg/mm²'e ($\cong 1.1$ kat) artış göstermiştir. Yine ayrıca artan G değerlerine bağlı olarak (sabit V'de) λ_1 değeri 590.00 μm 'den 317.00 μm 'ye ($\cong 1.9$ kat), λ_2 değeri 61.60 μm 'den 35.00 μm 'ye ($\cong 1.8$ kat) azalırken, HV_b değeri 60.14 kg/mm²'den 70.12 kg/mm²'e ($\cong 1,7$ kat) ve HV_e değeri 63.53 kg/mm²'den 72.00 kg/mm²'e ($\cong 1,1$ kat) artış göstermiştir.

Al-13.6Cu-6Si dendritik alaşımı için ölçülen ve Tablo 1'de verilen bu değerlere bağlı olarak çizilen grafikler üzerinde yapılan lineer regresyon analiz yöntemiyle belirlenen parametrelere bağlı bağıntılar Tablo 2'de verilmiş, ilgili grafikler üzerinde gösterilmiştir.

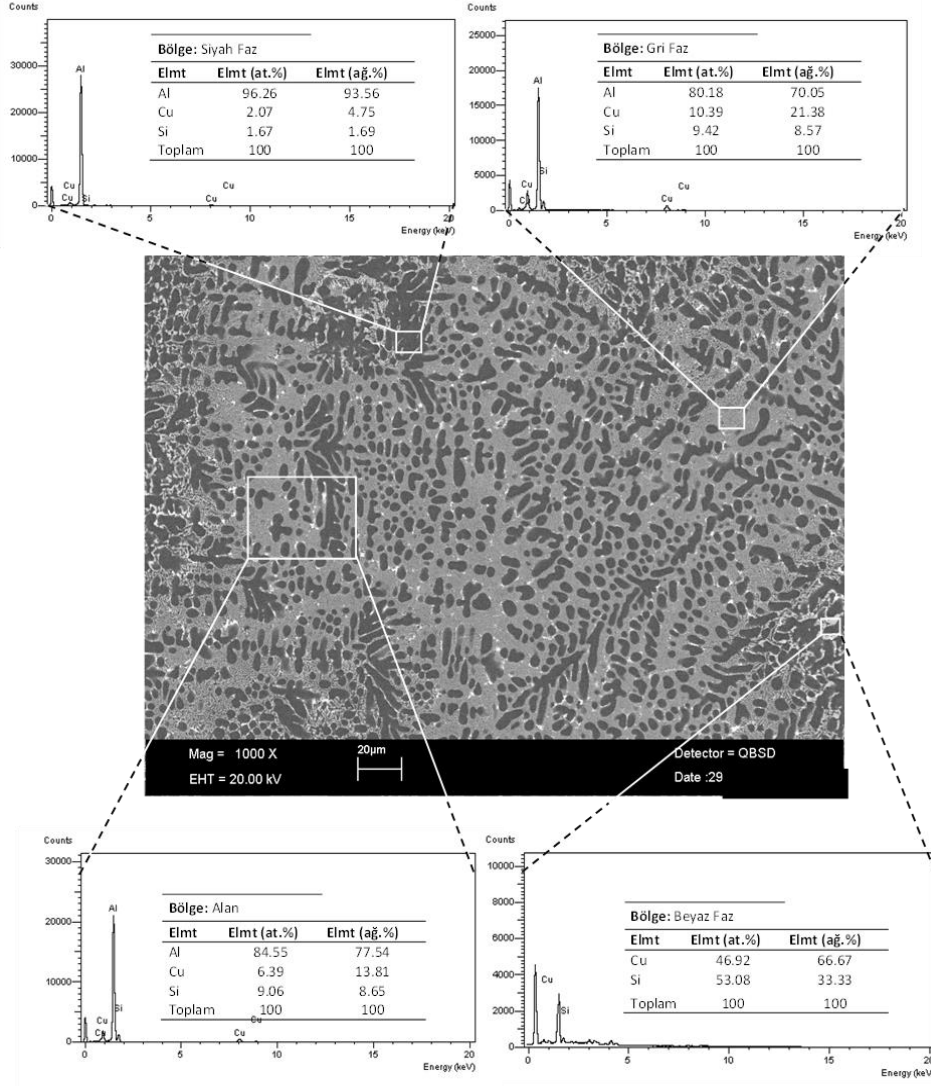
Tablo 1 ve Şekil 7 (a) ve (b)'de görüldüğü gibi λ_1 ve λ_2 değerleri artan V değerlerine bağlı olarak giderek azalmaktadır. Lineer regresyon analiz sonuçları Tablo 2'den de anlaşıldığı gibi sabit sıcaklık gradyentinde katılaştırma hızı arttıkça λ_1 -0.21 ve λ_2 -0.31 üstel değeriyle azalmaktadır.

Tablo 1 ve Şekil 7 (a) ve (b)'de görüldüğü gibi λ_1 ve λ_2 değerleri artan G değerlerine bağlı olarak giderek azalmaktadır. Tablo 2'de verilen ölçüm sonuçlarına göre regresyon analizi yapıldığında ise sabit katılaştırma hızında sıcaklık gradyenti arttıkça λ_1 -0.50 ve λ_2 -0.42 üstel değeriyle azalmaktadır.

Tablo 2'de Al-13.6Cu-6Si dendritik alaşımı için katılaştırma hızına ve sıcaklık gradyentine bağlı olarak elde edilen üstel değerler, literatürdeki benzer alaşım

sistemlerinin deney sonuçlarının verildiği **Tablo 3**'teki üstel değerlerle oldukça iyi uyumaktadır. Çalışılan alaşımın mikroyapısı **Şekil 4** ve **Şekil 5**'de görüldüğü gibi dendritik formdadır. Dendritik yapılarda teorik olarak λ_1 , G 'nin 0.5 ve V 'nin 0.25 kuvveti ile değişim gösterirken, λ_2 V 'nin 0.50 ve 0.66 kuvveti ile değişmektedir. Bu çalışmada sıcaklık

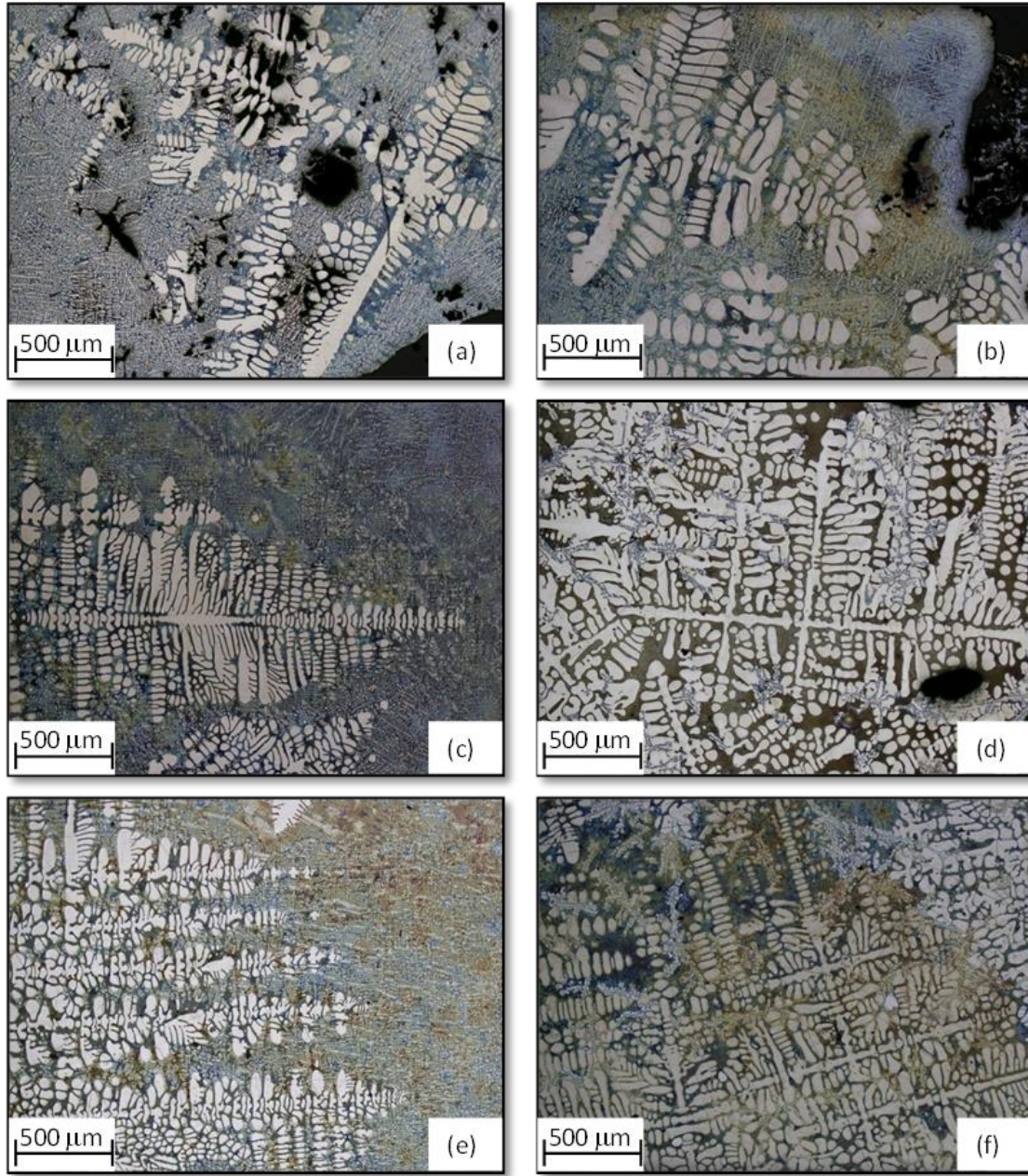
gradyentine bağlı olarak elde edilen λ_1 ve λ_2 üstel değerleri teorik modellerle oldukça uyum içerisinde iken katılma hızına bağlı olarak elde edilen üstel değerler biraz küçük çıkmıştır. Sayısal ve teorik modeller genellikle ikili seyreltik alaşımlara, sıcaklık gradyentlerine ve sınırlı katılma



Şekil 3. Al-Cu-Si dendritik alaşımının kimyasal bileşim analizi

Tablo 1. Al-Cu-Si alaşımı için elde edilen dendrit kol mesafeleri ve mikrosertlik değerleri

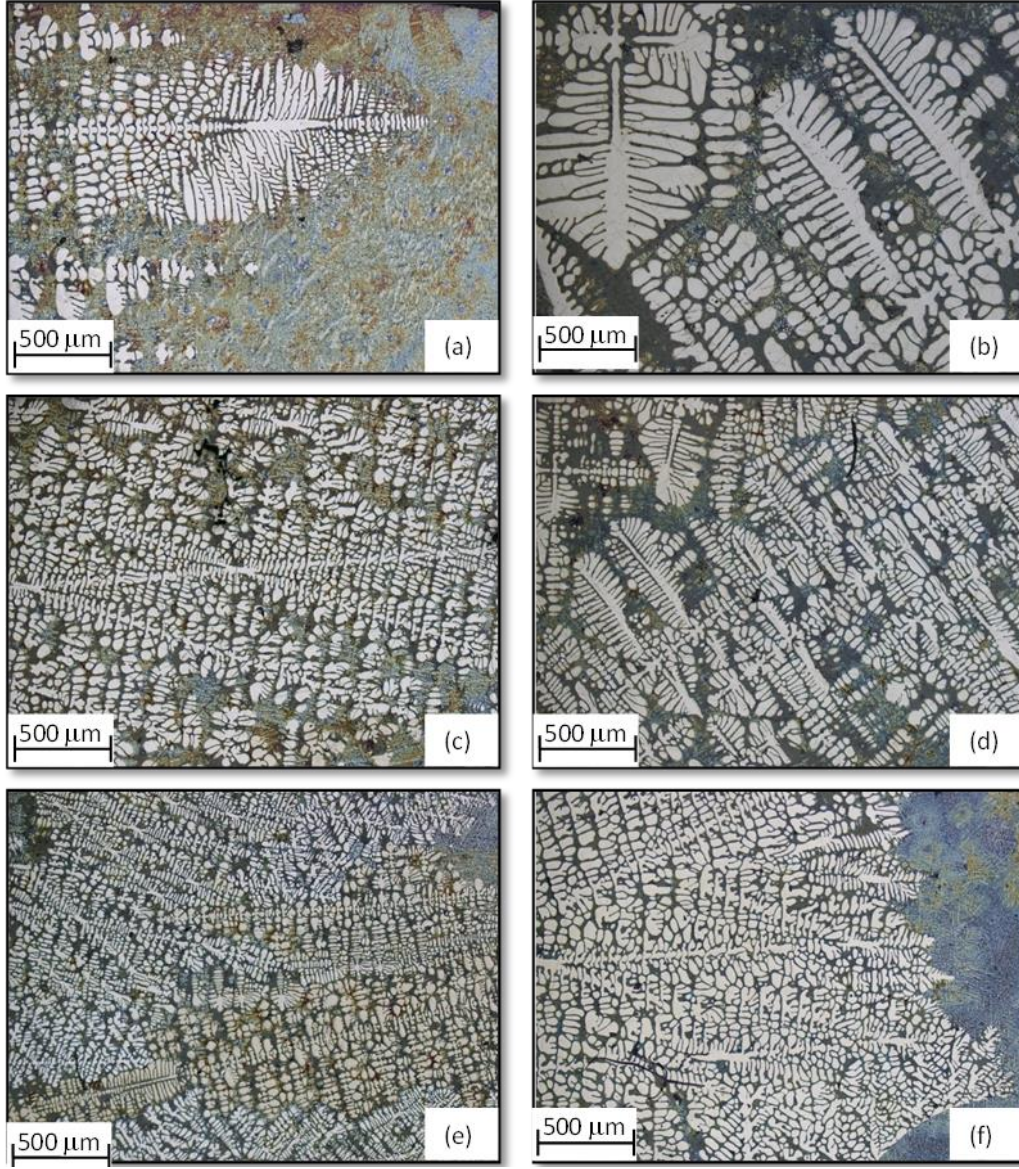
Katılaştırma Parametreleri		Dendrit Kollar Arası Mesafeler		Mikrosertlik Değerleri	
G (K/mm)	V ($\mu\text{m/s}$)	λ_1 (μm)	λ_2 (μm)	HV_b (kg/mm^2)	HV_c (kg/mm^2)
4.64	8.3	448.06 ± 20.00	44.76 ± 1.29	66.55 ± 1.20	68.73 ± 1.30
	17.4	338.00 ± 16.00	38.73 ± 1.27	68.33 ± 1.10	70.95 ± 1.40
	41.5	310.66 ± 9.00	31.41 ± 1.65	72.69 ± 1.00	72.99 ± 0.80
	83.0	282.60 ± 11.00	22.50 ± 0.69	74.15 ± 0.75	76.31 ± 0.90
	166.0	224.00 ± 10.00	17.95 ± 0.50	76.27 ± 1.40	78.65 ± 1.40
1.60		590.00 ± 15.0	61.60 ± 2.65	60.14 ± 0.55	63.53 ± 1.10
2.64		515.00 ± 11.0	47.60 ± 2.84	64.40 ± 1.10	65.65 ± 1.10
3.55	17.4	429.84 ± 10.0	40.54 ± 2.12	66.64 ± 0.90	69.26 ± 1.40
4.64		338.00 ± 9.4	38.73 ± 2.12	68.33 ± 1.10	70.95 ± 1.40
6.12		317.00 ± 8.5	35.00 ± 2.00	70.12 ± 1.20	72.00 ± 0.57



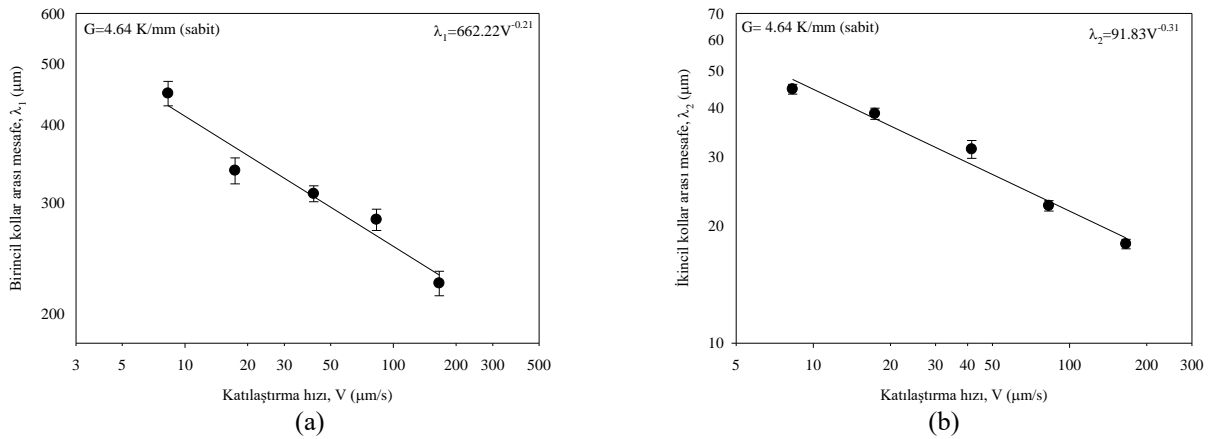
Şekil 4. Doğrusal katılaştırılmış Al-13.6Cu-6Si alaşımı için sabit katılaştırma hızında (17.4 µm/s) farklı sıcaklık gradyentlerinde oluşan mikroyapıların bazı optik mikroskop fotoğrafları (a) Boyuna kesit (b) Enine kesit (G=1.60 K/mm) (c) Boyuna kesit (d) Enine kesit (G=3.55 K/mm) (e) Boyuna kesit (f) Enine kesit (G=4.64 K/mm)

Tablo 2. Katılaştırma hızı ve sıcaklık gradyentine bağlı dendrit kol mesafeleri ve mikrosertlik arasındaki bağıntılar

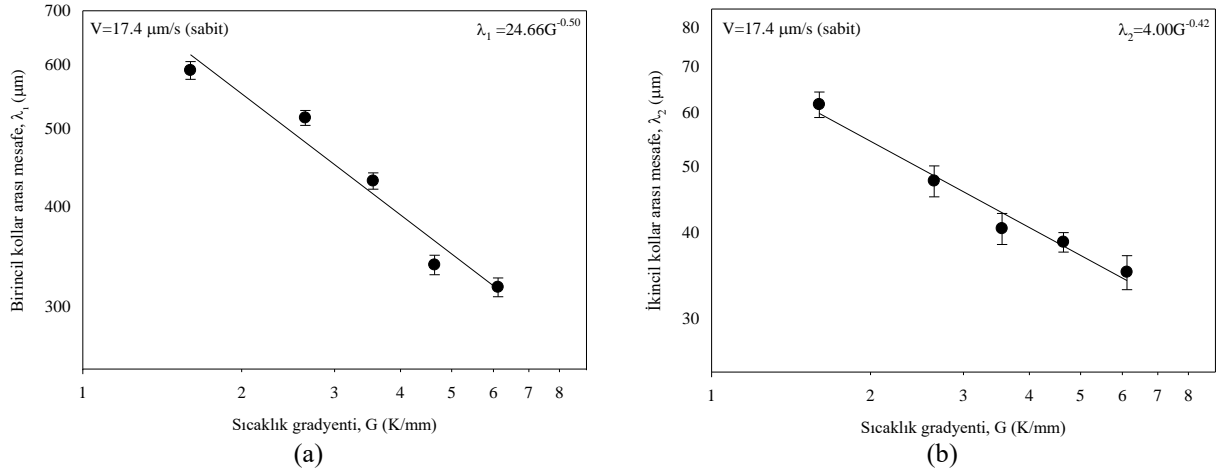
Bağıntılar	Sabitler (k)	Korelasyon Katsayıları (r)
$\lambda_1=k_1G^{-0.50}$	$k_1=24.66 (\mu\text{m}^{0.50}\text{K}^{0.50})$	$r_1=-0.976$
$\lambda_1=k_2V^{-0.21}$	$k_2=662.22 (\mu\text{m}^{1.21}\text{s}^{-0.21})$	$r_2=-0.972$
$\lambda_2=k_3G^{-0.42}$	$k_3=4.00 (\mu\text{m}^{0.58}\text{K}^{0.42})$	$r_3=-0.986$
$\lambda_2=k_4V^{-0.31}$	$k_4=91.83 (\mu\text{m}^{1.31}\text{s}^{-0.31})$	$r_4=-0.987$
$HV_b=k_5\lambda_1^{-0.23}$	$k_5=55.34 (\text{kg mm}^{-1.77})$	$r_5=-0.972$
$HV_b=k_6\lambda_2^{-0.19}$	$k_6=36.14 (\text{kg mm}^{-1.81})$	$r_6=-0.961$
$HV_e=k_7G^{0.11}$	$k_7=57.28 (\text{kg K}^{-0.11}\text{mm}^{-1.89})$	$r_7=0.994$
$HV_b=k_8G^{0.10}$	$k_8=60.40 (\text{kg K}^{-0.10}\text{mm}^{-1.90})$	$r_8=0.996$
$HV_e=k_9V^{0.05}$	$k_9=83.18 (\text{kg mm}^{-2.05}\text{sn}^{0.05})$	$r_9=0.990$
$HV_b=k_{10}V^{0.05}$	$k_{10}=84.92 (\text{kg mm}^{-2.05}\text{sn}^{0.05})$	$r_{10}=0.995$



Şekil 5. Doğrusal katılaştırılmış Al-13.6Cu-6Si alaşımı için sabit sıcaklık gradyenti (4.64 K/mm) ve farklı katılaştırma hızlarında oluşan mikroyapıların bazı optik mikroskop fotoğrafları (a) Boyuna kesit (b) Enine kesit (V=8.3 µm/s) (c) Boyuna kesit (d) Enine kesit (V=41.5 µm/s) (e) Boyuna kesit (f) Enine kesit (V=83 µm/s)



Şekil 6. Doğrusal katılaştırılmış Al-13.6Cu-6Si alaşımı için (a) V'ye göre λ_1 (b) V'ye göre λ_2



Şekil 7. Doğrusal katılaştırılmış Al-13.6Cu-6Si alaşımı için (a) G'ye göre λ_1 (b) G'ye göre λ_2

Tablo 3. Farklı alaşımlarda kontrollü katılaştırma üzerine yapılan çalışmalardan elde edilen bağıntılar

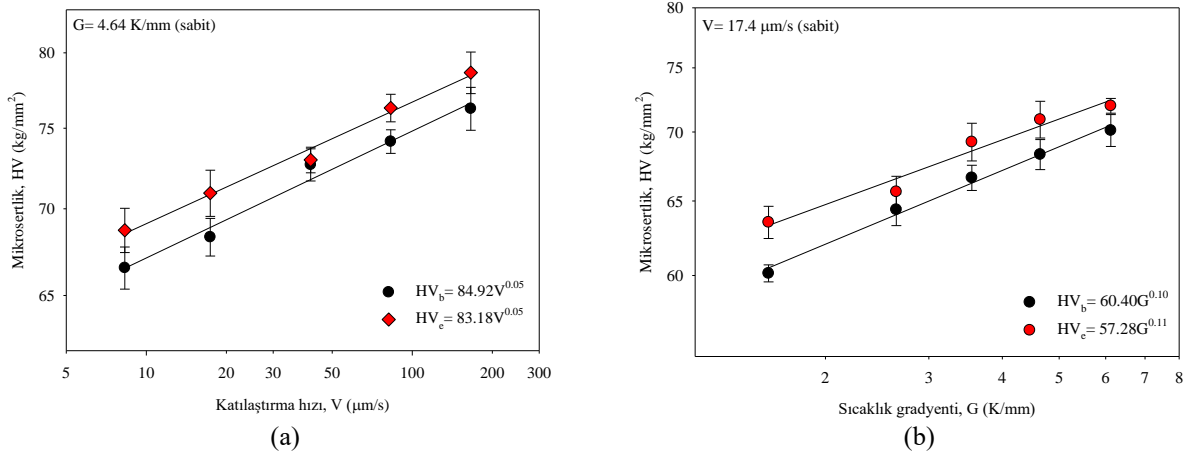
Alaşım (%ağ.)	$\lambda = kV^{-n}$	Referans
Al-3Si	$\lambda_1 = 866.96V^{-0.28}$ $\lambda_1 = 49.09G^{-0.47}$ $\lambda_2 = 124.17V^{-0.47}$ $\lambda_2 = 140.9G^{-0.58}$	[5]
Al-7Ni	$\lambda_1 = 851.1V^{-0.26}$ $\lambda_2 = 124.2V^{-0.48}$ $\lambda_1 = 567.5V^{-0.23}$	[6]
Al-15Cu	$\lambda_1 = 31.6G^{-0.43}$ $\lambda_2 = 82.2V^{-0.39}$ $\lambda_2 = 3.0G^{-0.48}$	[7]
Al-5.5Zn-2.5Mg-1.5Cu	$\lambda_1 = 743V^{-0.26}$ $\lambda_2 = 100V^{-0.41}$	[8]
Al-1.94Mn-0.5Si	$\lambda_1 = kV^{-0.22}$	[9]

hızlarına bağlı olması nedeniyle deneysel ve teorik değerler arasındaki tutarsızlıklar bileşimler, numune boyutları ve sıcaklık gradyentlerinden kaynaklanıyor olabilir.

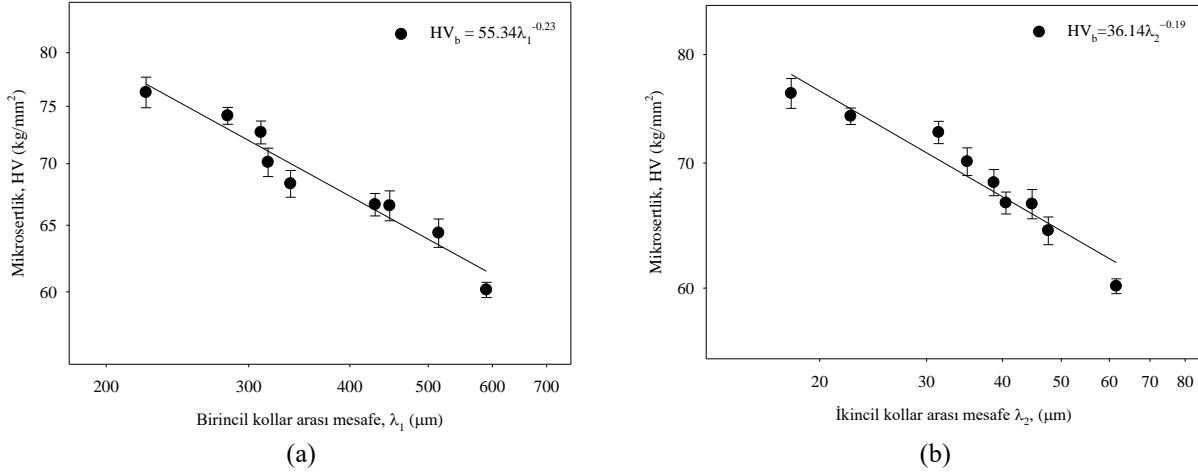
3.3 Mikrosertliğin (HV) mikroyapı (λ_1 ve λ_2) ve katılma parametrelerine (G ve V) bağlılığı

Tablo 1 ve Şekil 8 (a) ve (b)'de verilen grafikler incelendiğinde hem sıcaklık gradyenti hem de katılaştırma hızı arttığında mikrosertlik değerlerinin arttığı görülmektedir. Tablo 1'de verilen regresyon bağıntılarına göre sabit G değerinde V değerindeki artışa bağlı olarak HV_b 0.05 ve HV_e 0.05 üstel değeriyle, sabit V değerinde G değerindeki artışa bağlı olarak HV_b 0.10 ve HV_e 0.11 üstel değeriyle artış göstermektedir. Bu üstel değerlerden de görüleceği üzere, G'ye bağlı mikrosertlik üstel değerlerindeki değişim, V'ye bağlı mikrosertlik üstel değerlerindeki değişime kıyaslandığında yaklaşık olarak iki katlık daha fazla bir artış olduğu görülmektedir.

Tablo 1 ve Şekil 9 (a) ve (b)'de verilen grafikler incelendiğinde, mikrosertlik değerlerinin artan λ_1 ve λ_2 değerlerine bağlı olarak azaldığı görülmektedir. Tablo 2'de verilen ölçüm sonuçlarına göre HV değerinin λ_1 ve λ_2 'ye bağlılığı regresyon analiziyle incelendiğinde λ_1 'in -0.23 ve λ_2 'nin -0.19 üstel değerleriyle giderek azalma eğilimi gösterdiği görülmüştür.



Şekil 8. Doğrusal katılaştırılmış Al-13.6Cu-6Si alaşımı için (a) V'ye göre HV (b) G'ye göre HV



Şekil 9. Doğrusal katılaştırılmış Al-13.6Cu-6Si alaşımı için (a) λ_1 'ye göre HV (b) λ_2 'ye göre HV

Tablo 4. Farklı alaşımlarda mikrosertlik üzerine yapılan çalışmalardan elde edilen bağıntılar

Alaşım (%ağ.)	Mikrosertlik	Referans
Al-7Ni	$HV=66.1V^{0.11}$ $HV=309.0\lambda_1^{-0.35}$ $HV=114.8\lambda_2^{-0.24}$	[6]
Al-15Cu	$HV=121.9\lambda_1^{-0.25}$ $HV=67.9\lambda_2^{-0.17}$	[7]
Al-5.5Zn-2.5Mg-1.5Cu	$HV=111\lambda_2^{-0.11}$ $HV=92V^{0.04}$	[8]
Al-1.94Mn-0.5Si	$HV=kV^{0.05}$	[9]

Tablo 2'de Al-13.6Cu-6Si dendritik alaşımı için verilen katılaştırma hızı, sıcaklık gradyenti ve dendrit kol mesafeleriyle mikrosertlik arasındaki bağımlılığı gösteren üstel değerler ile literatürdeki benzer alaşım sistemlerinin deney sonuçlarının verildiği Tablo 4'deki üstel değerlerin oldukça uyumlu oldukları görülmektedir.

4 Sonuçlar

Yapılan bu deneysel çalışmada, katılma hızının ve sıcaklık gradyentinin tek yönlü doğrusal katılaştırılan üçlü Al-13.6Cu-6Si alaşımının mikroyapısı ve mikrosertliği üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Bu çalışmaya göre;

1. Hem sabit sıcaklık gradyentinde ($G=4.64$ K/mm) artan katılma hızında ($8.3-166.0$ $\mu\text{m/s}$) hem de sabit katılma hızında (17.4 $\mu\text{m/s}$) artan sıcaklık gradyentinde ($1.6-6.12$ K/mm) katılan alaşımların dendritik mikroyapılarının incelendiği gösterilmiştir.
2. Dendritik kol mesafe değerleri (λ_1 ve λ_2), V arttıkça azaldığı gibi G arttıkça da azalmıştır. Bu parametreler arasında elde edilen üstel değerler ($\lambda_1=k_1G^{-0.50}$, $\lambda_1=k_2V^{-0.21}$, $\lambda_2=k_3G^{-0.42}$ ve $\lambda_2=k_4V^{-0.31}$) bulunmuş ve literatürde benzer katılaştırma parametreleri için elde edilen üstel değerlerle karşılaştırılmıştır.
3. Mikrosertlik değerlerinin (HV_b ve HV_e), hem V hem de G değeri arttıkça arttığı, aynı zamanda λ_1 ve λ_2 değerleri arttıkça ise azaldığı bulunmuştur. HV , λ_1 ,

λ_2 , V ve G arasındaki ilişki ($HV_L=k_5\lambda_1^{-0.23}$, $HV_L=k_6\lambda_2^{-0.19}$, $HV_T=k_7G^{0.11}$, $HV_L=k_8G^{0.10}$, $HV_T=k_9V^{0.05}$ ve $HV_L=k_{10}V^{0.05}$) ifade edilmiş ve literatürde yerini almış üstel değerlerle uyumlu olduğu gösterilmiştir.

Teşekkür

Bu proje Niğde Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından FEB 2011/08 kod numarası ile desteklenmiştir. Yazarlar bu mali destek için Niğde Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projesi'ne teşekkür eder.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): % 14

Kaynaklar

- [1] L.R.Garcia, L.C.Peixoto, W.R.Osorio and A.Garcia, Globular-to-needle Zn-rich phase transition during transient solidification of a eutectic Sn-9%Zn solder alloy, Materials Letters, 63, 1314–1316, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2009.03.011>.
- [2] 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, p 157731, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.157331>.
- [3] D.G. McCartney and J.D. Hunt, Measurements of cell and primary dendrite arm spacings in directionally solidified aluminium alloys, Acta Metallurgica, 29, 1851–1863, 1981. [https://doi.org/10.1016/0001-6160\(81\)90111-5](https://doi.org/10.1016/0001-6160(81)90111-5).
- [4] H. Kaya, E. Çadırılı, U. Büyük and N. Maraşlı, Variation of microindentation hardness with solidification and microstructure parameters in the Al based alloys, Applied Surface Science, 255, 3071–3078,2008. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2008.08.080>.
- [5] H. Kaya, E. Çadırılı, M. Gündüz, Dendritic growth in an aluminum-silicon alloy, Journal of Materials

- Engineering and Performance, 16(1), 12–21, 2007. <https://doi.org/10.1007/s11665-006-9002-2>.
- [6] H. Kaya, U. Büyük, Çadırlı, 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] E. Çadırlı, Effect of solidification parameters on mechanical properties of directionally solidified Al-rich Al-Cu alloys, *Metals and Materials International*, 19, 411–422, 2013. <https://doi.org/10.1007/s12540-013-3006-x>.
- [8] E. Çadırlı, E. Nergiz, H. Kaya, U. Büyük, M. Şahin and M. Gündüz, Effect of growth velocity on microstructure and mechanical properties of directionally solidified 7075 alloy, *International Journal of Cast Metals Research*, 33:1, 11-23, 2020 <https://doi.org/10.1080/13640461.2020.1738131>
- [9] H. Kaya, E. Çadırlı 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.

