

Bridgman Yöntemi İle Katılaştırılmış Al-Cu-Si Ötektik Alaşımlarının Karakterizasyonu¹

Uğur Büyük²

Özet

Alüminyum şekillendirme kolaylığı, korozyona ve çevresel etkilere karşı direnci ve yüksek mukavemet/ağırlık oranı nedeniyle gıda endüstrisinden elektrik ve elektronik endüstrisine, otomotiv ve havacılık endüstrilerinden inşaat uygulamalarına kadar birçok sektörde yaygın olarak kullanılmaktadır. Çok bileşenli alüminyum alaşımlarının fiziksel özellikleri; kimyasal bileşime, yani alaşım elementlerine ve alaşım elementlerinin oranına bağlı olarak değişir. Alüminyum esaslı döküm alaşımlarında kullanılan ana alaşım elementleri silikon, bakır ve magnezyum olup, demir ve çinko artık elementler olarak kullanılır. Al-Si-Cu, güç aktarma organları ve şanzımanlarda büyük kullanım oranına sahiptir. Bu çalışmada, Al-26.5Cu-6Si (% ağırlıkça) üçlü ötektik alaşımının fiziksel özellikleri doğrusal katılaştırma yöntemi ile ilişkili olarak incelenmiştir. Alaşım vakumlu ergitme fırınında hazırlanmış ve Bridgman tipi fırın kullanılarak farklı katılaştırma hızlarında doğrusal olarak katılaştırılmıştır. Üretilen numunelerden Vickers mikrosertliği, maksimum çekme dayanımı ve elektriksel özdirenç değerleri ölçülmüş ve katılaştırma hızının bu değerleri önemli ölçüde etkilediği belirlenmiştir. Bu çalışmadaki sonuçlar, ikili Al-Cu ve dördü Al-Cu-Si-Fe ötektik alaşımları için elde edilen deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

1. GİRİŞ

Malzemelerin fiziksel özellikleri ve performansları, katılma sırasında oluşan mikroyapılar tarafından belirlenir. Mikroyapıların oluşumunu ve nasıl kontrol edileceğini anlamak, malzeme bilimi alanındaki temel zorluklardan biridir (Wilde vd., 2005; Morando vd., 2018). İkili alaşımlar on yıllardır

- 1 Bu araştırma Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından 112T588 numaralı proje ile desteklenmiştir.
- 2 Prof. Dr., Erciyes Üniversitesi, Eğitim Fakültesi, Matematik ve Fen Bilimleri Eğitimi Bölümü, Kayseri, Türkiye, buyuk@erciyes.edu.tr, ORCID: 0000-0002-6830-8349

hem teorik (Jackson & Hunt, 1966) hem de deneysel (McCartney, 1980a,b; Himemiya & Umeda, 1999; Himemiya, 1999; Himemiya, 2000) olarak çalışılmış olmasına rağmen, üç veya daha fazla bileşen içeren çok bileşenli alaşımların katılaştırılması sırasında oluşan mikroyapılar daha az araştırılmıştır.

Katılaştırma süreci ve bileşim (Co) malzemelerin mikroyapılarının belirlenmesinde en etkili iki unsurdur. Kontrollü katılaştırma; malzemenin bileşimini, sıcaklık gradyanını (G) ve katılaştırma hızını (V) yönetmek için kullanılabilir. Böylece malzemenin mikroyapısı değişir ve mekanik, elektriksel ve termal özellikler de etkilenir. Otomotiv ve uçak endüstrileri, farklı katılaştırma hızlarının alaşımların mekaniksel özellikleri üzerindeki etkisini ölçmek için genellikle kontrollü katılaştırma sürecini kullanmaktadırlar. Katılaştırma parametrelerinin termo-fiziksel özellikler üzerindeki etkilerini araştırmak için birçok deneysel çalışma yapılmıştır (Çadırılı vd., 1999; Hecht vd. 2004; Gündüz vd., 2004; Büyük & Maraşlı, 2009; Çadırılı vd., 2009; Büyük vd., 2009, 2010, 2011; Engin & Büyük, 2018; Büyük vd., 2020).

Son yıllarda kolay şekillendirilebilirlikleri, düşük özgül ağırlıkları, elektriksel ve termal iletkenlikleri ve yüksek korozyon dirençleri nedeniyle Al-Cu-Si alaşımlarının endüstride kullanımı artmıştır. Bu çalışmada, farklı hızlarda katılaştırılan Al-26.5Cu-6Si (% ağırlıkça) ötektik alaşımının Vickers mikrosertliği (HV), maksimum çekme dayanımı (UTS) ve elektriksel özdirenci (ρ) ölçülmüş ve bu parametrelerin katılaştırma hızı ile ilişkileri doğrusal regresyon analizi ve Hall-Petch denklemi ile araştırılmıştır. Bu çalışmadaki sonuçlar, ayrıca ikili Al-Cu ve dördü Al-Cu-Si-Fe ötektik alaşımları için elde edilen deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

2. DENEYSEL SÜREÇ

2.1. Doğrusal katılaştırma ve metalografi

Bu çalışma Al-%26.5Cu-%6Si ötektik alaşımına odaklanmaktadır. Bu alaşım, %99.99 saflıkta alüminyum, %99.98 saflıkta bakır ve %99.97 saflıkta silisyum kullanılarak vakum ortamında eritilmiştir. Alaşım daha sonra 200 mm uzunluğunda, 4 mm iç çapında ve 6.35 mm dış çapında 10 grafit kalıba dökülmüştür. Her bir numune Bridgman fırınına konmuş ve sabit bir sıcaklık gradyanı ($G=8.50$ K/mm) ve farklı katılaştırma hızlarında ($V=8.25-164.80$ $\mu\text{m/s}$) katılaştırılmıştır. Bridgman doğrusal katılaştırma fırınının şematik diyagramı ve detayları Şekil 1'de sunulmuştur.

Ani soğutulan (quench) numuneler, 10 mm uzunluğunda kesilmiş ve grafit kalıptan çıkarılmıştır. Her bir numune bir seri SiC zımpara kâğıdı

ile düzleştirildikten sonra TegraPol-15 Struers parlatma makinesi ile parlatılmıştır. Numunelerin mikroyapılarını gözlemek için her biri 10-15 saniyede 95 ml damıtılmış su+5 ml Hidroflorik Asit (HF) çözeltisinde dağlanmışır.

2.2. Katılařma parametrelerinin ölçümü

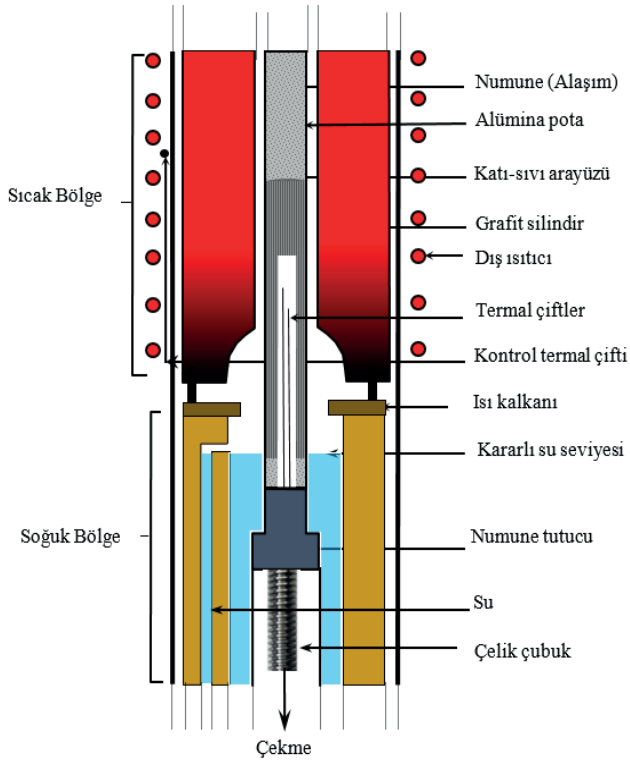
Numunedeki sıcaklık ölçümü üç adet K-tipi 0.25 mm çapında yalıtılmış termalçift kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Katılaştırma süreci boyunca soğuma hızları bilgisayar aracılığıyla bir veri kaydedicisiyle kaydedilmiştir. Sıvı fazdaki sıcaklık gradyanı ($G = \Delta T / \Delta X$) ve katılaştırma hızının değeri ($V = \Delta X / \Delta t$) her bir numune için belirlenmiştir.

2.3. Mikrosertlik ve maksimum çekme dayanımının ölçümü

Al-Cu-Si ötektik alaşımı için katılaştırma hızı, mikrosertlik ve maksimum çekme dayanımı arasındaki ilişkileri analiz etmek amacıyla numunelerin yüzeyleri parlatılmışır. Mikrosertlik ölçümleri, Future Tech FM-700 sertlik test cihazı (50-300 g yük ve 10 s tutma süresi) ile Vickers yöntemi kullanılarak numunelerin enine kesitlerinden yapılmıştır. Her değeri, en yüksek ve en düşük değeri hariç olmak üzere en az 10 ayrı ölçümün ortalaması alınarak hesaplanmıştır. Numunelerin maksimum çekme dayanımı, oda sıcaklığında 0.5 mm/dak test hızına sahip bir Shimadzu AG-IS çekme test cihazı ile ölçülmüştür. Çekme numuneleri, çekme eksenini numune büyüme yönüne paralel olacak şekilde 40 mm uzunluğunda ve 4 mm çapında hazırlanmıştır. Tüm çekme testleri, verilerin kararlılığını sağlamak için aynı test koşulları altında üç kez tekrarlanmıştır.

2.4. Elektriksel öz dirençlerin ölçümü

Metalik alaşımların önemli fiziksel özelliklerinden biri olan elektrik öz dirençleri genellikle dört nokta uç (four point prob) tekniğı kullanılarak ölçülür. Bu tekniğı göre, iki uç akım kaynağı oluşturmak için kullanılırken, diğeri iki uç voltajı ölçmek için kullanılır (Smiths, 1958; Gise & Blanchard, 1979). Bu çalışmada, akım-gerilim (IV) karakteristikleri Keithley 2400 Akım Uygulayıcı ve Keithley 2700 Multimetre kullanılarak bilgisayar kontrollü bir arayüz kartı aracılığıyla ölçülmüştür. Akım ve potansiyel ucu olarak 0.5 mm çapında platin teller kullanılmışır. Uygulanan akıma karşı voltaj düşüşü ölçülmüş ve elektrik direnci standart dönüşüm yöntemi kullanılarak hesaplanmıştır.



Şekil 1. Bridgman doğrusal katılaştırma fırınının şeması ve detayları

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. Katılaştırma hızının mikrosertlik üzerine etkisi

Katılaştırma hızındaki artış, Al-Cu-Si ötektik alaşımı için mikrosertlikte bir artışa neden olmuştur. Katılaştırma hızı 8,25'ten 164,80 $\mu\text{m/s}$ 'ye yükseldikçe, mikrosertlik değerleri 176.80'den 216.00 kg/mm^2 'ye yükselmiştir. Tablo 1, mikrosertlik değerlerinin katılaştırma hızıyla değişimini göstermektedir. Al-Cu-Si ötektik alaşımı için bu çalışmada elde edilen sonuçlar, Al-Cu ötektik alaşımı (Engin & Büyük, 2018) ve Al-Cu-Si-Fe ötektik alaşımı (Büyük vd., 2020) için elde edilen mikrosertlik değerleri ile karşılaştırılmış ve sonuçlar Şekil 2'de verilmiştir. Bu çalışmada Al-Cu-Si ötektik alaşımı için elde edilen HV değerleri (176.80-216.00 kg/mm^2), Al-Cu ötektik alaşımının HV değerlerinden (143.48-185.19 kg/mm^2) (Engin & Büyük, 2018) daha yüksek ve Al-Cu-Si-Fe ötektik alaşımının HV değerlerine (178.78-214.98 kg/mm^2) (Büyük vd., 2020) oldukça yakındır.

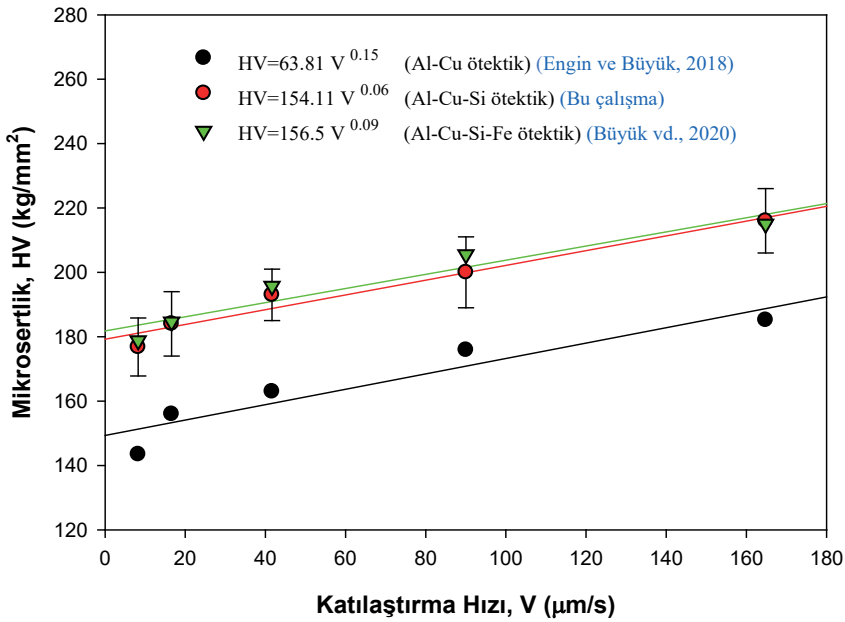
Tablo 1. Doğrusal katılaştırılmış Al-Cu-Si ötektik alaşımı için mikrosertlik, maksimum çekme dayanımı ve elektriksel öz direnç değerleri.

Alaşım (ağ.%)	Katılaştırma Parametreleri		Mikrosertlik	Maksimum Çekme Dayanımı	Elektriksel Öz direnç
	G (K/mm)	V ($\mu\text{m/s}$)	HV (kg/mm^2)	UTS (MPa)	$\rho \times 10^{-8}$ (Ωm)
Al- 26.5Cu- 6Si	8.50	8.25	176.80	75.39	6.86
		16.60	184.00	83.07	7.61
		41.65	193.00	87.46	7.83
		90.05	200.00	91.80	8.85
		164.80	216.00	104.00	9.56

Şekil2, doğrusal katılaştırılmış Al-Cu-Si ötektik alaşımının mikrosertliğinin katılaştırma hızıyla değiştiğini göstermektedir. Mikrosertlik ve katılaştırma hızı arasındaki ilişkiyi belirlemek için doğrusal regresyon analizi kullanılmış ve sonuçlar Tablo 2’de verilmiştir. Regresyon analizi sonucu $HV = 154.11(V)^{0.06}$ denklemi hesaplanmıştır. Ek olarak, mikrosertlik ve katılaştırma hızı arasındaki ilişkiyi elde etmek için Hall-Petch tipi korelasyon analizi de kullanılmış ve bu analiz sonucu $HV = 143.59 + 109.64(V)^{0.25}$ denklemi bulunmuştur. Bu değerler, Al-Cu-Si ötektik alaşımının mikrosertliğinin katılaştırma hızına bağlı artma ilişkisini göstermektedir. Üstel değerler 0.06 ve 0.25, farklı üçlü ötektik alaşım sistemleri için çeşitli araştırmacılar tarafından bildirilen üstel değerler ile (0.03-0.11) uyumludur (Çadırılı vd., 1999; Büyük & Maraşlı, 2009; Çadırılı vd., 2009; Büyük vd., 2009, 2010, 2011; Gündüz vd., 2004; Engin & Büyük, 2018; Büyük vd., 2020). Al-Cu-Si ötektik alaşımının mikroyapı değerleri, katılaştırma hızı arttıkça azalır ve bu da mikrosertlikte kayda değer bir artışa neden olur. Ayrıca, numune boyunca intermetalik fazların varlığı, mikrosertliğin değişiminde önemli bir faktördür. Bu çalışmada elementlerin alaşıma eklenmesinin mikrosertlik değeri üzerinde önemli bir etkisi olmuştur. Diğer taraftan Kaygısız ve Maraşlı’nın Al-Cu-Mg alaşımı için elde ettikleri sonuçlar (Kaygısız & Maraşlı, 2017), Al-Cu-Si alaşımı için bu çalışmada elde edilen sonuçlardan çok daha yüksek bir başlangıç mikrosertlik değeri (HV₀) göstermiştir. Ötektik Al-Cu-Mg alaşımının katılaştırma hızı arttıkça, ötektik dizi değişmeden kalmış, ancak kolonideki intermetalik fazların aralığı azalmıştır (Kaygısız & Maraşlı, 2017). Alaşımdaki Mg miktarının da mikrosertlik üzerinde önemli bir etkisi olduğu görülmektedir. Bununla birlikte, Al-Cu-Si alaşımının ötektik dizilimi daha yüksek katılaştırma hızlarında bozulduğu görülmüştür.

Tablo 2. Bazı doğrusal katılaştırılmış alaşımlar için katılaştırma hızı ile mikrosertlik, maksimum çekme dayanımı ve elektriksel öz direnç arasındaki ilişkiler:

Alaşım (ağ.%)	Mikrosertlik	Maksimum Çekme Dayanımı	Elektriksel Öz direnç	Kaynak
Al-33Cu	$HV = 121.74(V)^{0.09}$ $HV = 109.99 + 119.07(V)^{0.25}$	$UTS = 36.36V^{0.10}$ $UTS = 31.51 + 44.99(V)^{0.25}$	$\rho = 3.19 \times 10^{-8}(V)^{0.12}$	(Çadırılı vd., 1999)
Al-26.5Cu-6Si	$HV = 154.11(V)^{0.06}$ $HV = 143.59 + 109.64(V)^{0.25}$	$UTS = 62.00 V^{0.10}$ $UTS = 53.38 + 76.12 (V)^{0.25}$	$\rho = 5.52 \times 10^{-8}(V)^{0.10}$	(Bu çalışma)
Al-26.5Cu-6.5Si-0.5Fe	$HV = 156.54(V)^{0.06}$ $HV = 147.33 + 107.93(V)^{0.25}$	$UTS = 69.91 (V)^{0.06}$ $UTS = 65.56 + 47.98 (V)^{0.25}$	$\rho = 7.87 \times 10^{-8}(V)^{0.08}$	(Büyük vd., 2020)



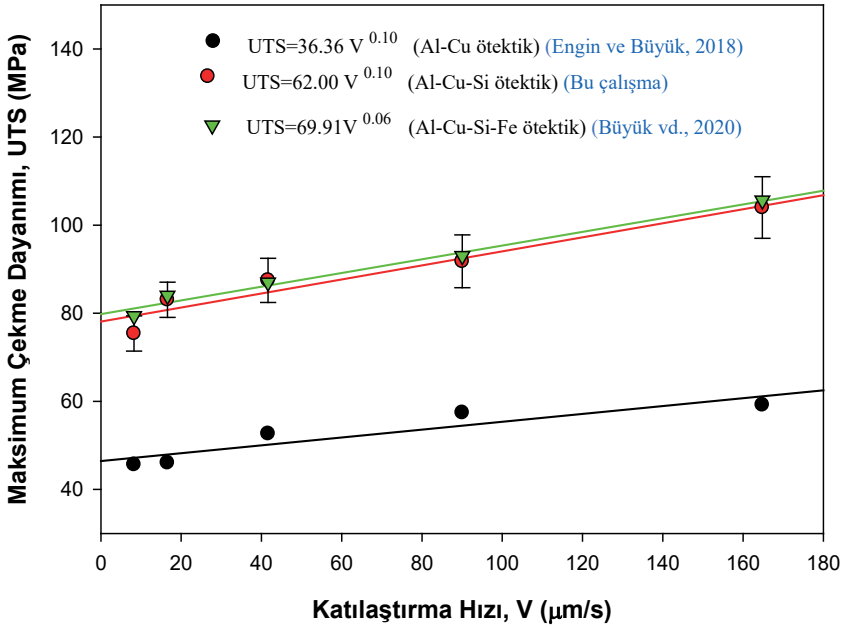
Şekil 2. Doğrusal katılaştırılmış Al-Cu-Si ötektik alaşım için katılaştırma hızının bir fonksiyonu olarak mikrosertliğin değişimi ve bazı deneysel sonuçlarla karşılaştırılması.

3.3. Katılaştırma hızının maksimum çekme dayanımı üzerine etkisi

Tablo 1, maksimum çekme dayanımı değerlerinin (UTS) katılaştırma hızı ile değişimini göstermektedir. Katılaştırma hızı 8.25'ten 164.80 µm/s'ye yükseldiğinde, maksimum çekme dayanımınının 75.39'dan 104.00 MPa'ya yükseldiği bulunmuştur. Bu çalışmada Al-Cu-Si ötektik alaşımı için elde edilen sonuçlar Al-Cu ötektik alaşımı (Engin & Büyük, 2018) ve Al-Cu-Si-Fe ötektik alaşımı (Büyük vd., 2020) ile karşılaştırılmış ve sonuçlar Şekil 3'te

sunulmuştur. Bu çalışmadan elde edilen UTS değerlerinin (75.39-104.00 MPa), Al-Cu ötektik alaşımı için elde edilen UTS değerlerinden (45.61-59.16 MPa) daha yüksek olduğu (Engin & Büyük, 2018) ve benzer koşullar altında katılaştırılan Al-Cu-Si-Fe ötektik alaşımına (79.34-105.62 MPa) (Büyük vd., 2020) yakın değerlerde olduğu bulunmuştur.

Şekil 3'ün doğrusal regresyon analizi, Al-Cu-Si ötektik alaşımındaki maksimum çekme dayanımının katılaştırma hızının bir fonksiyonu olarak değişimini göstermektedir. Maksimum çekme dayanımı ve katılaştırma hızı arasındaki ilişkiyi belirlemek için doğrusal regresyon analizi kullanılmış ve sonuçlar Tablo 2'de verilmiştir.



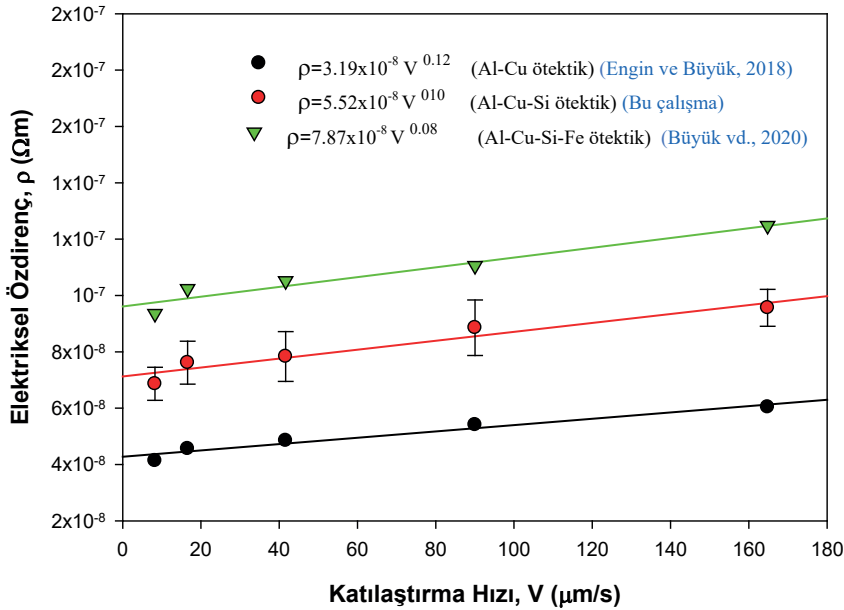
Şekil 3. Doğrusal katılaştırılmış Al-Cu-Si ötektik alaşım için katılaştırma hızının bir fonksiyonu olarak maksimum çekme dayanımının değişimi ve bazı deneysel sonuçlarla karşılaştırılması.

Regresyon analizi sonucu $UTS=62.00(V)^{0.10}$ denklemi hesaplanmıştır. Ek olarak, maksimum çekme dayanımı ve katılaştırma hızı arasındaki ilişkiyi elde etmek için Hall-Petch tipi korelasyon analizi de kullanılmış ve bu analiz sonucu $UTS=53.38+76.12(V)^{0.25}$ denklemi hesaplanmıştır. Erime sıcaklığındaki ilk maksimum çekme dayanımı 53.38 MPa ve katılaştırma hızına göre maksimum çekme dayanımı 76.12 MPa olarak bulunmuştur. Bu çekme dayanım değeri, bildirilen çeşitli alaşımlar için deneysel değerlerle

uyumludur (Engin Büyük, 2018; Büyük vd., 2020). Çekme dayanım değerleri; katılaştırma hızı, mikroyapı, metaller arası fazlar ve alışımda bulunan elementlerden etkilenebilir.

3.4. Katılaştırma hızının elektriksel özdirenç üzerine etkisi

Bu çalışmada, Al-Cu-Si ötektik alaşımı için katılaştırma hızının elektriksel özdirenç önemli ölçüde etkilediği belirlenmiştir. Katılaştırma hızı 8.25'ten 164.80'e $\mu\text{m/s}$ yükseldikçe, elektriksel özdirençin 6.86×10^{-8} 'den 9.56×10^{-8} Ωm 'ye yükseldiği bulunmuştur. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar Al-Cu ötektik alaşımı (Engin & Büyük, 2018) ve Al-Cu-Si-Fe ötektik alaşımı (Büyük vd., 2020) ile karşılaştırılmış ve Şekil 4'te verilmiştir.



Şekil 4. Doğrusal katılaştırılmış Al-Cu-Si ötektik alaşımı için katılaştırma hızının bir fonksiyonu olarak elektrik özdirençini değişimi ve bazı deneysel sonuçlarla karşılaştırılması.

Mevcut çalışmada elde edilen doğrusal katılaştırılmış Al-Cu-Si ötektik alaşımında farklı katılaştırma hızları (8.25-164.80 $\mu\text{m/s}$) için ρ değerleri (6.86×10^{-8} – 9.56×10^{-8} Ωm), Al-Cu ötektik alaşımının ρ değerlerinden daha yüksektir (4.13×10^{-8} - 6.03×10^{-8} Ωm) (Engin & Büyük, 2018) ve benzer koşullar altında katılaştırılan Al-Cu-Si-Fe ötektik alaşımının ρ değerlerinden (9.34×10^{-8} - 12.47×10^{-8} Ωm) (Büyük vd., 2020) daha düşüktür. Al-Cu-Si ötektik alaşımının doğrusal regresyon analizi ρ ile alaşımın V 'si arasında

$\rho=5.52 \times 10^{-8} (V)^{0.10}$ şeklinde ifade edilen bir ilişki ortaya çıkarmıştır. Bu çalışmanın sonuçları, üçlü Al-Cu-Si ötektik alaşımının öz direncinin, farklı araştırmacılar tarafından çalışılmış olan Al-Cu-Mg ve Al-Si-Mg üçlü alaşımlarından daha yüksek olduğunu göstermektedir (Kaygısız & Maraşlı, 2015; Kaygısız & Maraşlı, 2017). Benzer deneysel koşullar altında elde edilen elektriksel öz direnç değerlerinin eklenen farklı elementlerin miktarlarından etkilenebileceği açıktır.

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, doğrusal katılaştırılan Al-Cu-Si ötektik alaşımının katılaştırma hızı ile mikrosertlik, maksimum çekme dayanımı ve elektriksel öz direnç değeri arasındaki ilişkileri belirlemek amacıyla deneysel çalışmalar yürütülmüştür. Elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir. Al-Cu-Si ötektik alaşımı için; katılaştırma hızı 8.25'ten 164.80 $\mu\text{m/s}$ 'ye yükseldikçe, mikrosertlik 176.80'den 216.00 kg/mm^2 'ye, maksimum çekme dayanımı 75.39'dan 104.00 MPa'ya ve elektriksel öz direnç 6.86×10^{-8} 'den $9.56 \times 10^{-8} \Omega\text{m}$ 'ye yükselmiştir. Regresyon analizi sonucu katılaştırma hızı ile mikrosertlik, maksimum çekme dayanımı ve elektriksel öz direnç değerleri arasındaki ilişkiler: $HV=154.11(V)^{0.06}$, $UTS=62.00 (V)^{0.10}$, $\rho=5.52 \times 10^{-8}(V)^{0.10}$ olarak hesaplanmıştır. Mikrosertlik ve maksimum çekme dayanımı için Hall-Petch tipi ilişkiler, katılaştırma hızının bir fonksiyonu olarak: $HV=143.59+109.64 (V)^{0.25}$, $UTS=53.38+76.12(V)^{0.25}$ olarak elde edilmiştir.

TEŞEKKÜR

Bu araştırma Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından 112T588 numaralı proje ile desteklenmiştir. Yazar, finansal destekleri için Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumu'na teşekkür eder.

Kaynaklar

- Böyük, U., Engin, S., Kaya, H., & Maraşlı, N. (2010). Effect of solidification parameters on the microstructure of Sn-3.7Ag-0.9Zn solder. *Materials Characterization*, 61, 1260-1267. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2010.08.007>
- Böyük, U., Engin, S., & Maraşlı, N. (2011). Microstructural characterization of unidirectional solidified eutectic Al-Si-Ni alloy. *Materials Characterization*, 62(9), 844-851. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2011.05.010>
- Böyük, U., & Maraşlı, N. (2009). The microstructure parameters and microhardness of directionally solidified Sn-Ag-Cu eutectic alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, 485, 264-269. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2009.06.067>
- Böyük, U., Maraşlı, N., Kaya, H., Çadırılı, E., & Keşlioğlu, K. (2009). Directional solidification of Al-Cu-Ag alloy. *Applied Physics A*, 95, 923-932. <https://doi.org/10.1007/s00339-009-5130-5>
- Böyük, U., Engin, S., Kaya, H., Çadırılı, E., & Maraşlı, N. (2020). Directionally solidified Al-Cu-Si-Fe quaternary eutectic alloys. *Physics of Metals and Metallography*, 121(1), 78-83. <https://doi.org/10.1134/s0031918x20010044>
- Çadırılı, E., Böyük, U., Kaya, H., Maraşlı, N., Keşlioğlu, K., Akbulut, S., & Ocak, Y. (2009). The effect of growth rate on microstructure and micro-indentation hardness in the In-Bi-Sn ternary alloy at low melting point. *Journal of Alloys and Compounds*, 470, 150-156. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2008.02.056>
- Çadırılı, E., Ülgen, A., & Gündüz, M. (1999). Directional solidification of the aluminium-copper eutectic alloy. *Materials Transactions, JIM*, 40(9), 989-996. <https://doi.org/10.2320/matertrans1989.40.989>
- Engin, S., & Böyük, U. (2018). Variations with growth rate of the microstructural, mechanical and electrical properties of directionally solidified the Al-Cu alloy. *Gümüşhane University Journal of Science and Technology Institute*, 8(2), 209-221. <https://doi.org/10.17714/gumusfenbil.349996>
- Gise, P. E., & Blanchard, R. (1979). *Semiconductor and integrated circuit fabrication techniques*. Reston Publishing Company.
- Gündüz, M., Kaya, H., Çadırılı, E., & Özmen, A. (2004). Interflake spacings and undercoolings in Al-Si irregular eutectic alloy. *Materials Science and Engineering: A*, 369, 215-229. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2003.11.020>
- Hecht, U., Gránásy, L., Pusztai, T., Böttger, B., Apel, M., Witusiewicz, V., Ratke, L., Wilde, J., De, Froyen, L., Camel, D., Drevet, B., Faivre, G., Fries, S. G., Legendre, B., & Rex, S. (2004). Multiphase solidification in multicomponent alloys. *Materials Science and Engineering: R*, 46, 1-49.

- Himemiya, T. (1999). Growth models of two-phase eutectic cell in a ternary eutectic system: A phase selection map. *Materials Transactions, JIM*, 40(7), 675-684. <https://doi.org/10.2320/matertrans1989.40.675>
- Himemiya, T. (2000). Extension of cellular/dendritic eutectic growth model to off-monovariant range: Phase selection map of a ternary eutectic alloy. *Materials Transactions, JIM*, 41(3), 437-443. <https://doi.org/10.2320/matertrans1989.41.437>
- Himemiya, T., & Umeda, T. (1999). Three-phase planar eutectic growth models for a ternary eutectic system. *Materials Transactions, JIM*, 40(7), 665-674. <https://doi.org/10.2320/matertrans1989.40.665>
- Jackson, K. A., & Hunt, J. D. (1966). Lamellar and rod eutectic growth. *Transactions of the Metallurgical Society of AIME*, 226, 1129-1142.
- Kaygısız, Y., & Maraşlı, N. (2015). Microstructural, mechanical and electrical characterization of directionally solidified Al-Si-Mg eutectic alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, 618, 197-203. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2014.08.056>
- Kaygısız, Y., & Maraşlı, N. (2017). Microstructural, mechanical, and electrical characterization of directionally solidified Al-Cu-Mg eutectic alloy. *Physics of Metals and Metallography*, 118(4), 389-398. <https://doi.org/10.1134/s0031918x17040123>
- McCartney, D. G., Hunt, J. D., & Jordan, R. M. (1980a). The structures expected in a simple ternary eutectic system: Part II. The Al-Ag-Cu ternary system. *Metallurgical Transactions A*, 11(8), 1251-1257. <https://doi.org/10.1007/bf02653478>
- McCartney, D. G., Hunt, J. D., & Jordan, R. M. (1980b). The structures expected in a simple ternary eutectic system: Part I. Theory. *Metallurgical Transactions A*, 11(8), 1243-1249. <https://doi.org/10.1007/bf02653477>
- Morando, C., & Fornaro, O. (2018). Morphology and phase formation during the solidification of Al-Cu-Si and Al-Ag-Cu ternary eutectic systems. *Materials Research*, 21(2), e20170930. <https://doi.org/10.1590/1980-5373-mr-2017-0930>
- Smiths, F. M. (1958). Measurement of sheet resistivities with the four-point probe. *The Bell System Technical Journal*, 37, 711-718. <https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1958.tb03883.x>
- De Wilde, J., Nagels, E., Lemoisson, F., & Froyen, L. (2005). Unconstrained growth along a ternary eutectic solidification path in Al-Cu-Ag: Preparation of a MAXUS sounding rocket experiment. *Materials Science and Engineering: A*, 413-414, 514-520. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2005.08.171>

