



Doğrusal Katılaştırılmış $\text{Sn}_{91.2-x}-\text{Zn}_{8.8}-\text{Ag}_x$ Alaşımlarının Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi

Investigation the Mechanical Properties of the Directionally Solidified $\text{Sn}_{91.2-x}-\text{Zn}_{8.8}-\text{Ag}_x$ Alloys

Mevlüt Şahin

Ömer Halis Demir Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Elektronik ve Otomasyon Bölümü, Niğde, Türkiye

Öz

Bu çalışmada, $\text{Sn}_{91.2-x}-\text{Zn}_{8.8}-\text{Ag}_x$ ($x=$ ağırlık % 0.15, 0.3, 0.7, 1.0, 3.0, 10.0) alaşımları vakumlu eritme fırını ve döküm fırını kullanılarak hazırlandı. Daha sonra numuneler sabit fırın sıcaklığında (500 °C), farklı katılaştırma hızlarında (8.3-790 $\mu\text{m/s}$) Bridgman tipi doğrusal katılaştırma fırınında yukarı yönlü doğrusal katılaştırıldı. Katılaştırma hızının (V), çekme dayanımına (σ_c) ve basma akma dayanımına (σ_b) etkisi araştırıldı. Lineer regresyon analizi ile çekme dayanımının ve basma akma dayanımının katılaştırma hızına bağımlılığı tespit edildi. Katılaştırma hızındaki artışın soğuma hızını artırdığı, soğuma hızındaki bu artışında mikroyapıyı küçülttüğü, bunun sonucunda da çekme ve akma dayanımlarının arttırdığı tespit edildi. Deneysel sonuçlar literatürle karşılaştırıldı.

Anahtar Kelimeler: Akma dayanımı, Çekme dayanımı, Doğrusal katılaştırma, Katılaştırma hızı

Abstract

In this study, $\text{Sn}_{91.2-x}-\text{Zn}_{8.8}-\text{Ag}_x$ ($x=0.15, 0.3, 0.7, 1.0, 3.0, 10.0$ wt.%) alloys have been prepared by using vacuum melting furnace and casting furnace. Then the samples have been directionally solidified upwards with a constant furnace temperature (500 °C) at different solidification rates (8.3-790 $\mu\text{m/s}$) in a Bridgman type directional solidification furnace. The effect of solidification rate (V) on ultimate tensile strength (σ_u) and compressive yield strength (σ_c) were investigated. The dependency of ultimate tensile strength and yield strength on solidification rate were determined by the linear regression analysis. It has been found that the increases of the solidification rate increases the cooling rate, with the increment in the cooling rate refines the microstructure, as a result of this the ultimate tensile strength and yield strength increases. The experimental results have been compared with the literature.

Keywords: Yield strength, Ultimate tensile strength, Directional solidification, Solidification rate

1. Giriş

Bazı saf malzemelerin kristalleşmesi büyük önem taşır. Bazı elektronik cihazların temelini oluşturan birleşik (integrated) devrelerin üretimi, yeterince kusursuz büyük tek kristallerin üretilmesi ile elde edilebilir. Bu kristallerin üretilmesinde değişik katılaştırma metodları kullanılır. Bridgman tipi doğrusal (kontrollü) katılaştırma yöntemi de (Gündüz ve Çadırlı 2002) teknolojiye en çok kullanılan kristal büyütme tekniklerinden bir tanesidir. Alaşımların düzlemsel cephede kontrollü olarak katılaştırılması pratikte tek kristallerin büyütülmesinde, malzemeleri arıtmada ve büyütülen malzemede kontrollü bir üniform veya üniform olmayan bileşim elde etmede kullanılır. Bu tür katılaştırmanın en önemli ticari uygulaması yarıiletken-

ler için tek kristallerin büyütülmesidir. Metal ve alaşımların düzlemsel cephede katılaştırılması kristalleri araştırmada çok yaygın olarak kullanılmaktadır. Doğrusal katılaştırma yöntemi ile alaşımların sertlik, gerilme dayanımı gibi bazı mekanik özellikleri katılaştırma parametrelerine bağlı olarak artırılabilir (Fan vd. 2010, Liu vd. 1998, Büyük ve Maraşlı 2009, Kaya vd. 2008, Fan vd. 2011, Büyük vd. 2012, Garcia vd. 2010, Osorio ve Garcia 2002, Santos vd. 2007, Goulart vd. 2010, Fan vd. 2015, Yan vd. 2014, Hu vd. 2013, Peng vd. 2015).

Kalay esaslı alaşımlar kurşun esaslı alaşımların sebep olduğu zararlardan uzaktır. Bu alaşımlarla yapılan kaynakta düşük sıcaklığın yeterli olması, düşük maliyeti ve kullanımı kolaylığıyla sert kaynağa mükemmel bir alternatif yapar. Sn-Zn alaşımları da düşük erime sıcaklığına sahip olmasından, maliyetinin düşük olmasından ve iyi dayanıma sahip olduğundan Sn-Pb alaşımlarının yerini almaktadır. Bununla beraber, kolay

*Sorumlu yazarın e-posta adresi: msahin@nigde.edu.tr

oksitlenmesi ise bu lehim alaşımlarının kullanımını sınırlamaktadır. Sn-Zn alaşımlarının lehimplenebilme özelliğini arttırmak için bazı katkılar yapılmaktadır. Alaşımların lehimplenebilme özellikleri ve mekanik dayanımları uygun katkı miktarlarına kadar artmaktadır (El-Daly ve Hammad 2010, Shafiq vd. 2012, Shalaby 2010, Ahmed vd. 2010, El-Daly ve Hammad 2010, Wenxu vd. 2010, Hung vd. 2006, Das vd. 2009).

Dolayısıyla bu çalışmanın amacı, katılaştırma hızının farklı miktarlarda Ag katkılı doğrusal katılaştırılmış Sn-8.8Zn ötektik alaşımlarının çekme ve basma akma dayanımlarına etkisini araştırmaktır.

2. Gereç ve Yöntem

2.1. Alaşımın Üretilmesi ve Dökümünün Yapılması

Alaşım hazırlamada kullanılacak metallerin miktarları hassas terazi ile tartıldıktan sonra erime sıcaklığı düşük olan metal altta kalacak şekilde metal malzemeler vakumlu eritme fırını içerisindeki grafit potaya yerleştirildi. Vakum pompası çalıştırılarak fırın vakumlandı. 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 birkaç kez karıştırıldı. Böylece eriyik haldeki metalik alaşımlar hazırlanmış oldu. Vakumlu eritme fırınında hazırlanan ve yeterli miktarda karıştırılarak homojen hale getirilen eriyik, maşa ile vakit geçirilmeden huni yardımıyla döküm fırınındaki numune kalıplarına döküldü. Döküm fırınının alt ısıtıcısı kapatıldı, üst ısıtıcı çalışır haldeyken numune kalıbının altında bulunan soğutma kazanından su geçirilerek tek yönlü katılaştırma başlatıldı. Katılma tamamlandıktan sonra üst ısıtıcı da kapatılarak fırının soğuması beklendi. Fırın tamamen soğuduktan sonra, dökümü yapılan grafit numune kalıpları fırından çıkarıldı. Böylece bu döküm aşamasından sonra numuneler doğrusal katılaştırılma için hazırlanmış oldu.

2.2. Doğrusal Katılaştırma

Alaşımların doğrusal katılaştırılmasında kullanılan Bridgman tipi doğrusal katılaştırma fırınının şematik gösterimi Şekil 1'de verilmiştir. Doğrusal katılaştırma için numunemiz numune tutucusuna tutturuldu. Daha sonra numunemiz fırının sıcak bölgesine yerleştirildi. Fırın sıcaklığının 500 °C olması için sıcaklık kontrolcüsü istenilen sıcaklığa set edildi ve varyak kademeli olarak artırılarak oda sıcaklığından itibaren ısıtılmaya başlandı. Fırın 500 °C sıcaklığa ulaştığında yaklaşık 20 dakika bu sıcaklıkta termal dengeye gelmesi için beklendi. Fırın dengeye geldikten sonra senkronize motor ile numune fırının sıcak bölgesinden soğuk bölgesine doğru çekildi. Numune 14-15 cm katılaştıktan sonra su verme işlemi yapıldı.

Numunelerin mikroyapılarını açığa çıkarmak için zımparalama, parlatma ve dağlama işlemleri yapıldı. Parlatma işlemi tamamlanan numunelerin mikroyapılarının optik mikroskopta açığa çıkarılması için % 92 CH₃OH, % 5 HNO₃ ve % 3 HCl ile dağlandı. Alaşımın üretilmesinin, doğrusal katılaştırılmasının ve mikroyapılarının açığa çıkarılmasının detayları kaynak (Şahin 2012)'de detaylı bir şekilde anlatılmıştır.

2.3. Çekme Dayanımı Testleri

Çekme dayanımı, mühendislik gerilme-gerinme grafiğinde ulaşılan en yüksek noktadır. Numunelerin çekme dayanım testleri oda sıcaklığında 1 mm/dak deformasyon hızında Shimadzu AG-XD 50 kN mekanik çekme cihazında gerçekleştirildi.

Çekme dayanımı σ (N/mm² veya MPa),

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (1)$$

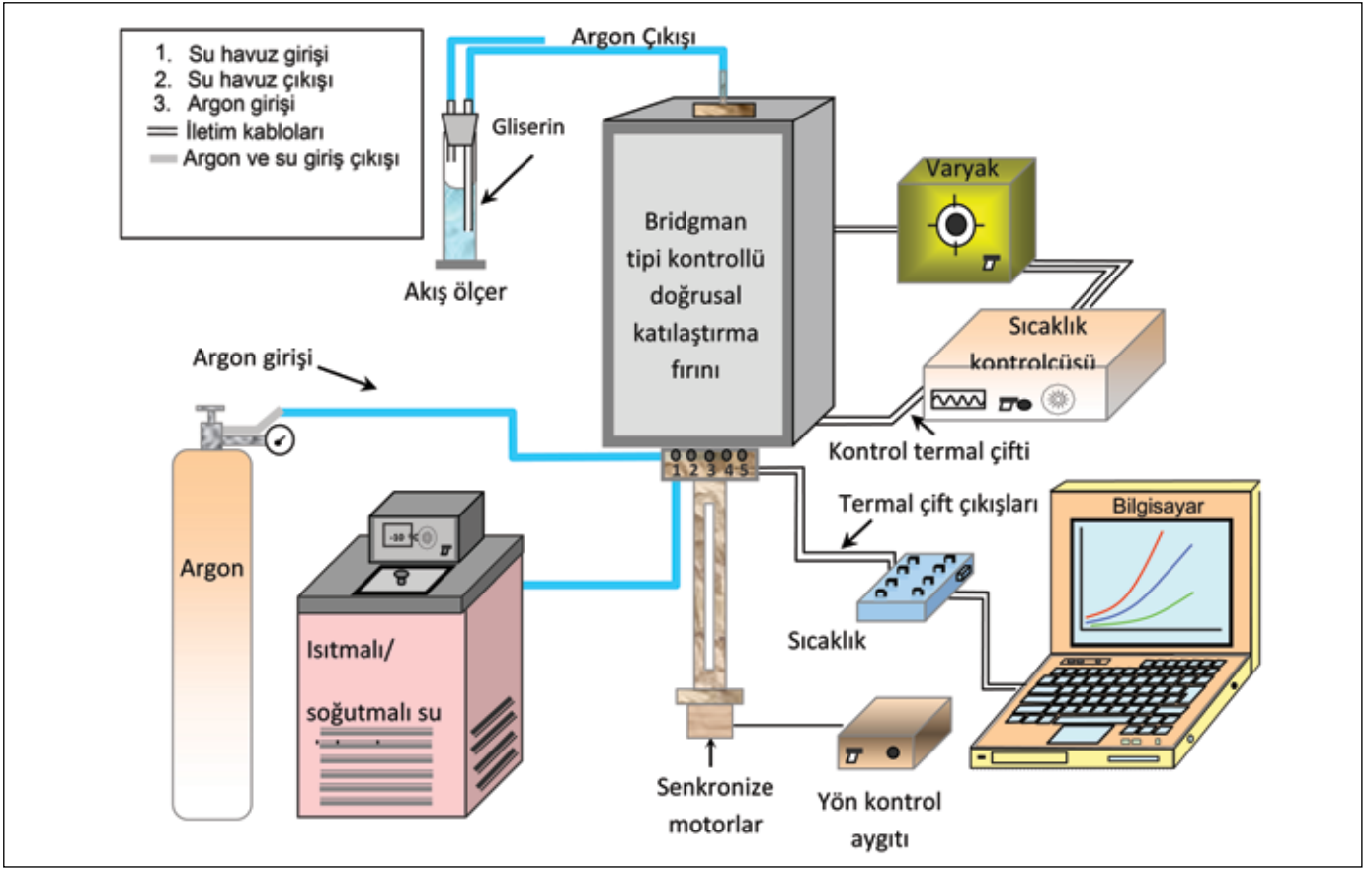
eşitliği ile hesaplanır. Burada, F çekme kuvveti, A ise malzemenin deformasyona uğramadan önceki kesit alanıdır. Deformasyon (uzama) miktarı ϵ ,

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{L - L_0}{L_0} \quad (2)$$

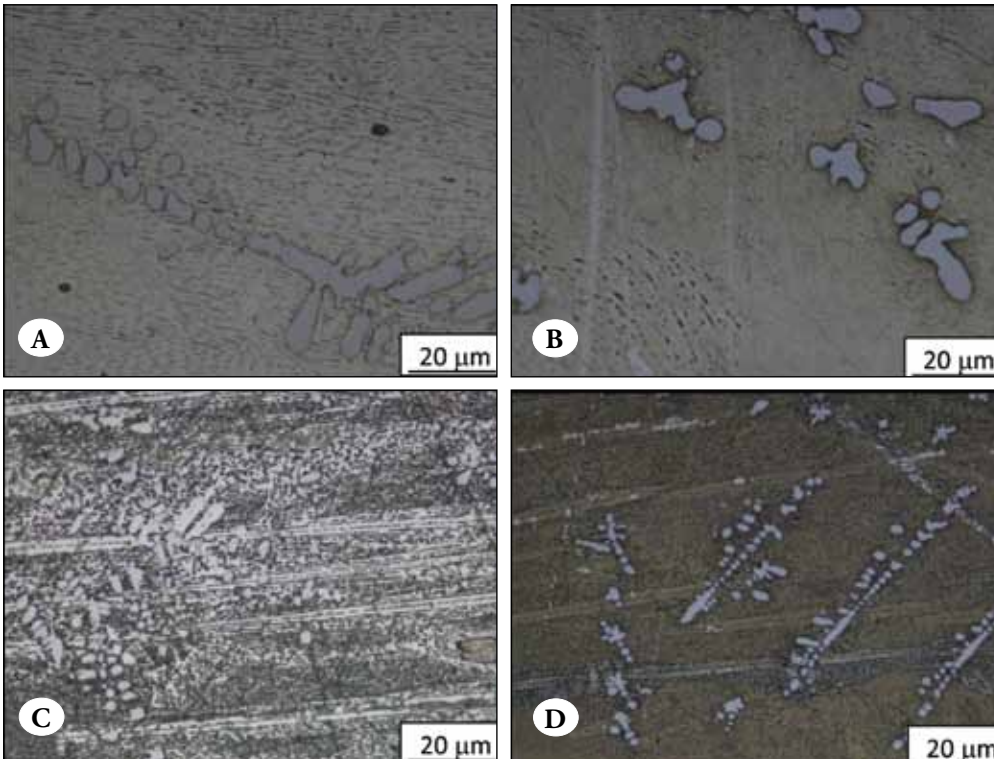
eşitliği ile hesaplanır. Burada, ΔL anlık alınan deformasyon miktarı, L_0 ise başlangıç uzunluğudur. Çekme dayanım testleri için farklı katılaştırma hızlarında doğrusal katılaştırılmış yaklaşık 40 mm uzunluğunda, 4 mm çaplı dairesel kesite sahip numuneler kullanıldı. Çekme dayanım testleri yapılan alaşımların gerilme-uzama eğrilerinden elde edilen çekme dayanımının katılaştırma hızına bağımlılığı belirlendi.

2.4 Basma Akma Dayanımı Testleri

Basma deneyi, çekme basma makinelerinde basma kuvveti uygulamak sureti ile yapılır. Basma deneyinde homojen bir gerilim dağılımı sağlamak amacıyla yuvarlak kesitli numuneler tercih edilir. Basma deneyi numunelerinde, numune yüksekliği (h_0) ile çapı (d_0) arasındaki h_0/d_0 oranı çok önemlidir. Numunenin h_0/d_0 oranının çok büyük olması, deney sırasında numunenin bükülmesine ve homojen olmayan gerilim dağılımına sebep olur. Bu oran küçüldükçe numune ile basma plakaları arasında meydana gelen sürtünme deney sonuçlarını çok fazla etkilemektedir. Bu sebeple numunenin h_0/d_0 oranının metalik malzemeler için $1.5 \leq h_0/d_0 \leq 2$ aralığında olması önerilir. Malzemenin plastik deformasyonun başladığı noktadaki gerilme değerine akma dayanımı denir. Çalışılan alaşımlar sert malzemeler olmadığından dolayı, basma testlerinden sadece akma dayanımı ölçümleri yapılabildi. Bu ölçümler için 4 mm çapa ve 6-8 mm uzunluğa sahip numuneler kullanıldı.



Şekil 1. Bridgman tipi doğrusal katılaştırma fırınının şematik gösterimi.



Şekil 2. Doğrusal katılaştırılmış Sn-8.8Zn-0.7Ag alaşımına ait mikroyapılar A) boyuna kesit B) enine kesit ($V=8.3 \mu\text{m/s}$), C) boyuna kesit D) enine kesit ($V=166 \mu\text{m/s}$).

3. Sonuçlar, Tartışma ve Öneriler

3.1. Mikroyapılar

Şekil 2-5 arasında Olympus BX-51 marka optik mikroskop ile farklı objektifler (x10, x20, x50) kullanılarak, farklı katılaştırma hızlarında numunelerin enine ve boyuna kesitlerinden çekilen mikroyapı fotoğraflarının bazıları verilmiştir. Düşük katılaştırma hızında çubuksal yapılı ötektikler ve dendritler kaba yapıda iken, katılaştırma hızının artmasıyla ötektik ve dendritik mikroyapılar küçülmüştür. Çok yüksek hızlarda ise çok daha ince taneli mikroyapılar oluşmuştur. Sn-ağ.% 8.8 Zn-ağ.% 1.0 Ag alaşımında tüm hızlarda dendritik ve ötektik yapının birlikte bulunduğu yapılar meydana gelirken (Şekil 3). Sn-ağ.% 8.8 Zn-ağ.% 3.0 Ag alaşımında ise dendritlerin ağırlıklı olduğu bir mikroyapı meydana gelmiştir (Şekil 4).

Katılaştırma hızındaki artış soğuma hızını artırır, soğuma hızındaki bu artış mikroyapıda küçülmeye sebebiyet verir. Hızlı katılaştırma durumunda ısı transferi için daha az zaman bulunduğundan yani atomlar sıvı fazdan katı faza bir anda geçemeyip daha fazla altsöğümeye ihtiyaç duyduklarından, erime ısısının hızlı uzaklaştırılması ile ilave dentrit kollar ortaya çıkar ve büyür. Daha ince ve yoğun dentritik yapı, erime gizli ısısının altsöğuyan sıvıya daha fazla iletilmesini sağlar. Bunun sonucunda da daha ince yapıli mikroyapılar meydana gelir.

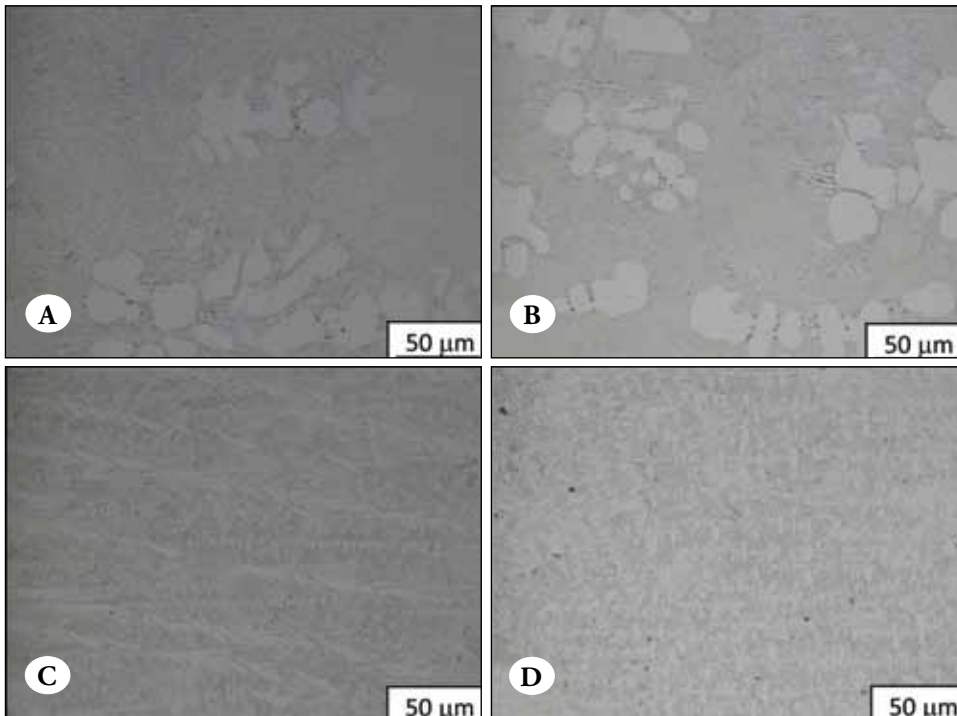
3.2. Çekme Dayanımları

Alaşımların, sabit fırın sıcaklığında (500°C) çekme dayanımlarının katılaştırma hızına bağımlılıkları Şekil 6'da,

bu parametreler arası bağıntılar ise Çizelge 1'de verilmiştir. Katılaştırma hızındaki artış çekme dayanımını arttırmıştır. Katılaştırma hızının 8.3 µm/s'den 790 µm/s'ye artması; Sn-8.8Zn alaşımında çekme dayanımını 54.0 MPa'dan 74.9 MPa değerine (Karakurt, F. 2015), Sn-8.8Zn-0.3Ag alaşımında 65.0'den 91.6 MPa değerine, Sn-8.8Zn-0.7Ag alaşımında 53.4'den 84.9 MPa değerine, Sn-8.8Zn-1.0Ag alaşımında 50.9 MPa'dan 64.4 MPa değerine, Sn-8.8Zn-3.0Ag alaşımında 25.2'den 37.4 MPa değerine, Sn-8.8Zn-10.0Ag alaşımında 30.0 MPa'dan 46.6 MPa değerine arttırmıştır (Çizelge 2). Sn-Zn-Ag alaşımlarının çekme dayanım testleri pek çok araştırmacı (El-Daly ve Hammad 2010, Hung vd. 2006, Chen vd. 2006, Ahmed vd. 2010, Lee vd. 2008, Song vd. 2003, Klasik vd. 2012) tarafından yapılmıştır. Deneysel sonuçlar Çizelge 3'de verilmiştir. Aynı alaşım için çekme dayanım değerlerinin farklılık göstermesinin nedenlerinden iki tanesi, alaşımların farklı yöntemlerle üretimlerinden ve gerilme hızlarının farklı olmasından kaynaklanmaktadır.

3.3. Basma Dayanımları

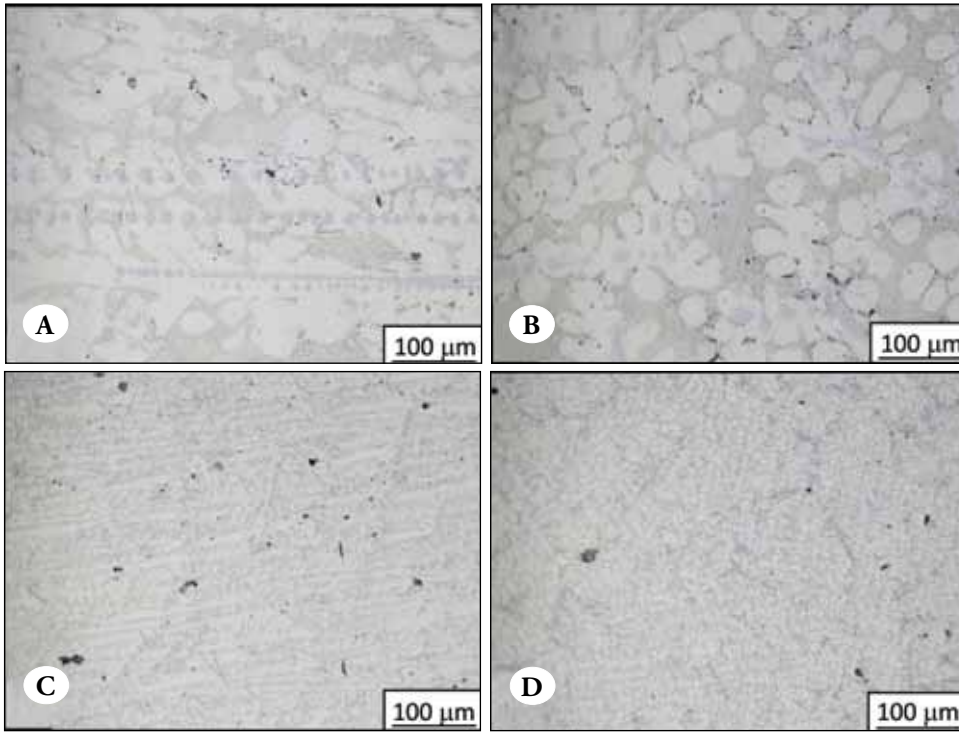
Alaşımların, sabit fırın sıcaklığında (500 °C) basma akma dayanımlarının katılaştırma hızına bağımlılıkları Şekil 7'de, bu parametreler arası bağıntılar ise Çizelge 4'de verilmiştir. Katılaştırma hızındaki artış basma akma dayanımının artmasına neden olmuştur. Hızın 8.3 µm/s'den 790 µm/s'ye artması; Sn-8.8Zn alaşımında akma dayanımını 74.7 MPa'dan 116.6 MPa değerine (Karakurt, F. 2015), Sn-8.8Zn-0.15Ag alaşımında 68.1'den 107.8 MPa değerine, Sn-8.8Zn-0.3Ag alaşı-



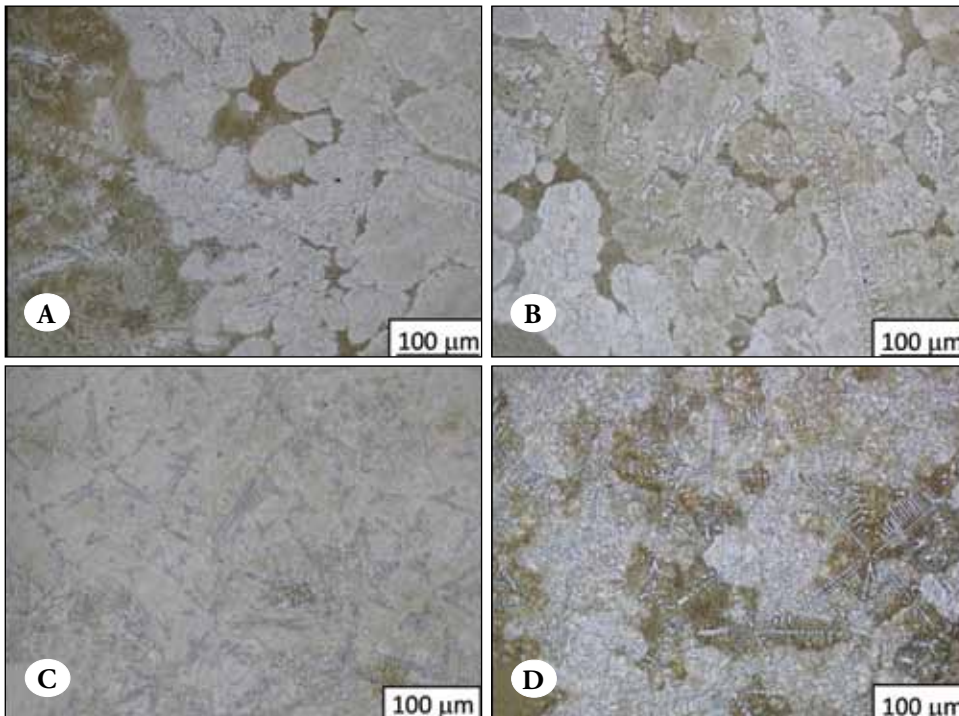
Şekil 3. Doğrusal katılaştırılmış Sn-8.8Zn-1.0Ag alaşımına ait mikroyapılar A) boyuna kesit B) enine kesit (V=8.3 µm/s), C) boyuna kesit D) enine kesit (V=790 µm/s).

mında 62.0'den 88.6 MPa değerine, Sn-8.8Zn-0.7Ag alaşımında 50.0'den 71.1 MPa değerine, Sn-8.8Zn-1.0Ag alaşımında 39.1 MPa'dan 44.6 MPa değerine, Sn-8.8Zn-3.0Ag alaşımında 34.8 MPa'dan 45.4 MPa değerine ve Sn-8.8Zn-10.0Ag alaşımında 48.2'den 62.5 MPa değerine arttırmıştır (Çizelge 5).

Şekil 2-5 arasında görüldüğü gibi katılaştırma hızının artması mikroyapıyı küçültmüştür. Mikroyapının küçülmesi de çekme ve basma dayanımlarında artışa sebebiyet vermiştir. Bu çalışmada görüldüğü gibi mikroyapı katılaştırma parametreleri ile, mekanik özelliklerde katılaştırma ve mikroyapı parametreleri-



Şekil 4. Doğrusal katılaştırılmış Sn-8.8Zn-3.0Ag alaşımına ait mikroyapılar **A)** boyuna kesit **B)** enine kesit ($V=8.3 \mu\text{m/s}$), **C)** boyuna kesit **D)** enine kesit ($V=790 \mu\text{m/s}$).



Şekil 5. Doğrusal katılaştırılmış Sn-8.8Zn-10.0Ag alaşımına ait mikroyapılar **A)** boyuna kesit **B)** enine kesit ($V=41.5 \mu\text{m/s}$), **C)** boyuna kesit **D)** enine kesit ($V=790 \mu\text{m/s}$).

nin değişimi ile kontrol edilmektedir. Dolayısıyla mikroyapı araştırmaları üzerine daha da yoğunlaşarak numunelerin fiziksel özellikleri daha da iyileştirilebilir.

4. Sonuç

Bu çalışmada, Sn_{91.2-x}-Zn_{8.8}-Ag_x (x= ağırlık % 0.15, 0.3, 0.7, 1.0, 3.0, 10.0) alaşımları sabit fırın sıcaklığında (500 °C), farklı katılaştırma hızlarında (8.3-790 µm/s) Bridgman tipi doğrusal

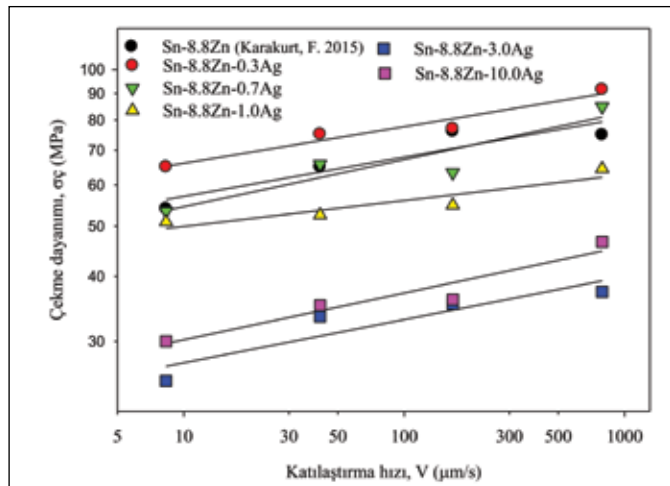
katılaştırma fırınında yukarı yönlü doğrusal katılaştırıldı. Katılaştırma hızının, çekme dayanımına ve basma akma dayanımına etkisi araştırıldı. Katılaştırma hızındaki artışın mikroyapıyı küçülttüğü, bunun sonucunda da çekme ve akma dayanımlarını arttırdığı tespit edildi. Çekme dayanımı Sn-8.8Zn-0.3Ag alaşımında en yüksek, basma dayanımında Sn-8.8Zn alaşımında en yüksek değerde ölçüldü.

Çizelge 1. Çekme dayanımlarının katılaştırma hızına bağlılıkları.

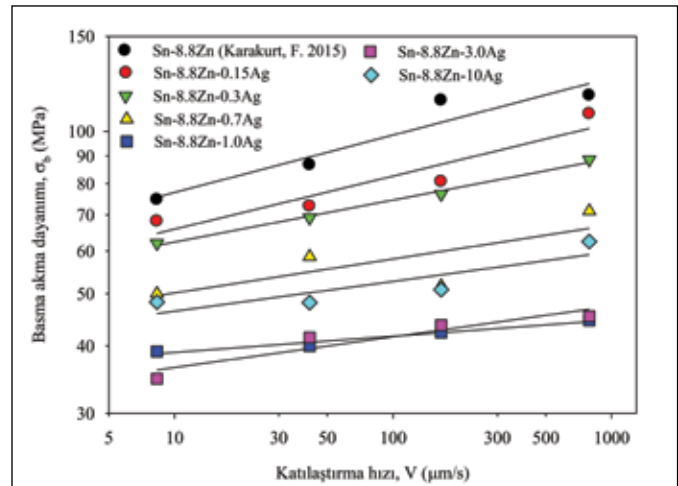
Bağıntılar	Sabitler (k)	Korelasyon katsayısı (r)	Alaşım
$\sigma_{\zeta} = kV^{0.08}$	$k=83.86 \text{ MPa mm}^{-0.08} s^{0.08}$	$r=0.922$	(Sn-8.8Zn)
$\sigma_{\zeta} = kV^{0.07}$	$k=90.99 \text{ MPa mm}^{-0.07} s^{0.07}$	$r=0.973$	(Sn-8.8Zn-0.3Ag)
$\sigma_{\zeta} = kV^{0.09}$	$k=82.22 \text{ MPa mm}^{-0.09} s^{0.09}$	$r=0.922$	(Sn-8.8Zn-0.7Ag)
$\sigma_{\zeta} = kV^{0.05}$	$k=62.91 \text{ MPa mm}^{-0.05} s^{0.05}$	$r=0.923$	(Sn-8.8Zn-1.0Ag)
$\sigma_{\zeta} = kV^{0.08}$	$k=39.99 \text{ MPa mm}^{-0.08} s^{0.08}$	$r=0.916$	(Sn-8.8Zn-3.0Ag)
$\sigma_{\zeta} = kV^{0.09}$	$k=45.71 \text{ MPa mm}^{-0.09} s^{0.09}$	$r=0.960$	(Sn-8.8Zn-10.0Ag)

Çizelge 2. Çekme dayanımlarının katılaştırma hızı ile değişimi.

Alaşım	V (µm/s) 8.3	V (µm/s) 41.5	V (µm/s) 166.0	V (µm/s) 790.0
Sn-8.8Zn (Karakurt, F. 2015)	54.0	65.0	76.1	74.9
Sn-8.8Zn-0.3Ag	65.0	75.1	77.0	91.6
Sn-8.8Zn-0.7Ag	53.4	65.8	63.4	84.9
Sn-8.8Zn-1.0Ag	50.9	52.5	54.8	64.4
Sn-8.8Zn-3.0Ag	25.2	33.5	35.4	37.4
Sn-8.8Zn-10.0Ag	30	35.2	36.1	46.6



Şekil 6. Çekme dayanımlarının katılaştırma hızı ile değişimi.



Şekil 7. Basma akma dayanımlarının katılaştırma hızı ile değişimi.

Çizelge 3. Sn-Zn-Ag alaşımlarına ait çekme dayanım değerleri.

Bileşim (ağ.%)	σ_c (MPa)	$\dot{\epsilon}$ (s ⁻¹)	Kaynak
Sn-8.8Zn-0.3 Ag	65.0-91.6	10 ⁻³	Bu çalışma
Sn-8.8Zn-0.7 Ag	53.4-84.9	10 ⁻³	Bu çalışma
Sn-8.8Zn-0.5 Ag	62.0	0.94x10 ⁻³	(Chen vd. 2006)
Sn-9.0Zn-0.5 Ag	41.3	0.52x10 ⁻³	(Ahmed vd. 2010)
Sn-8.8Zn-1.0 Ag	50.9-64.4	10 ⁻³	Bu çalışma
Sn-9.0Zn-1.0 Ag	43.6	0.52x10 ⁻³	(Ahmed vd. 2010)
Sn-9.0Zn-1.0 Ag	43	0.35x10 ⁻³	(Lee vd. 2008)
Sn-8.8Zn-1.0 Ag	46	0.75x10 ⁻³	(Song vd. 2003)
Sn-9.0Zn-1.0 Ag	76	-	(Klasik vd. 2012)
Sn-9.0Zn-1.0 Ag	53	0.75x10 ⁻³	(Hung vd. 2006)
Sn-9.0Zn-1.5 Ag	56.3	1.8x10 ⁻³	(Daly ve Hammad, 2010)
Sn-8.8Zn-3.0 Ag	25.2-37.4	1.2x10 ⁻³	Bu çalışma
Sn-9.0Zn-3.5 Ag	37	0.75x10 ⁻³	(Song vd. 2003)
Sn-9.0Zn-4.0 Ag	51	0.35x10 ⁻³	(Lee vd. 2008)

Çizelge 4. Basma akma dayanımlarının katılaştırma hızına bağlılıkları.

Bağıntılar	Sabitler (k)	Korelasyon katsayısı (r)	Alaşım
$\sigma_b = kV^{0.11}$	k=125.30 MPa mm ^{-0.11} s ^{0.11}	r=0.953	(Sn-8.8Zn)
$\sigma_b = kV^{0.10}$	k=104.71 MPa mm ^{-0.10} s ^{0.10}	r=0.942	(Sn-8.8Zn-0.15Ag)
$\sigma_b = kV^{0.08}$	k=90.57 MPa mm ^{-0.08} s ^{0.08}	r=0.996	(Sn-8.8Zn-0.3Ag)
$\sigma_b = kV^{0.06}$	k=65.61 MPa mm ^{-0.06} s ^{0.06}	r=0.767	(Sn-8.8Zn-0.7Ag)
$\sigma_b = kV^{0.03}$	k=44.6 MPa mm ^{-0.03} s ^{0.03}	r=0.982	(Sn-8.8Zn-1.0Ag)
$\sigma_b = kV^{0.06}$	k=47.4 MPa mm ^{-0.06} s ^{0.06}	r=0.939	(Sn-8.8Zn-3.0Ag)
$\sigma_b = kV^{0.05}$	k=59.70 MPa mm ^{-0.05} s ^{0.05}	r=0.867	(Sn-8.8Zn-10.0Ag)

Çizelge 5. Basma akma dayanımlarının katılaştırma hızı ile değişimi.

Alaşım	V (µm/s) 8.3	V(µm/s) 41.5	V(µm/s) 166.0	V(µm/s) 790.0
	σ_b (MPa)	σ_b (MPa)	σ_b (MPa)	σ_b (MPa)
Sn-8.8Zn (Karakurt, F. 2015)	74.7	86.7	114.2	116.6
Sn-8.8Zn-0.15Ag	68.1	72.6	80.7	107.8
Sn-8.8Zn-0.3Ag	62.0	69.2	76.5	88.6
Sn-8.8Zn-0.7Ag	50.0	58.5	51.7	71.1
Sn-8.8Zn-1.0Ag	39.1	40.0	42.3	44.6
Sn-8.8Zn-3.0Ag	34.8	41.5	43.7	45.4
Sn-8.8Zn-10.0Ag	48.2	48.1	50.9	62.5

5. Teşekkür

Bu çalışma FEB 2013/18 no'lu proje kapsamında Ömer Halis Demir Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından desteklenmiştir. Yazar olarak katkılarından dolayı teşekkür ederim.

6. Kaynaklar

- Ahmed, M., Fouzder, T., Sharif, A., Gain, A.K., Chan, Y.C. 2010.** Influence of Ag micro- particle additions on the microstructure, hardness and tensile properties of Sn-9Zn binary eutectic solder alloy. *Microelectronics Reliability*, 50: 1134-1141.
- Böyük, U., Maraşlı, N. 2009.** The microstructure parameters and microhardness of directionally solidified Sn-Ag-Cu eutectic alloy. *J. Alloy. Compd.*, 485: 264-269.
- Böyük, U., Maraşlı, N., Çadırılı, E., Kaya, H., Keşlioğlu, K. 2012.** Variations of microhardness with solidification parameters and electrical resistivity with temperature for Al-Cu-Ag eutectic alloy. *Curr. Appl. Phys.*, 12: 7-10
- Chen, K.I., Cheng, S.C., Wu, S., Wu, S., Lin, K.L. 2006.** Effects of small additions of Ag, Al and Ga on the structure and properties of the Sn-9Zn eutectic alloy. *J. Alloy. Compd.*, 416: 98-105.
- Das, S.K., Sharif, A., Chan, Y.C., Wong, N.B., Yung, W.K.C. 2009.** Influence of small amount of Al and Cu on the microstructure, microhardness and tensile properties of Sn-9Zn binary eutectic solder alloy. *J. Alloy. Compd.*, 481: 167-172.
- El-Daly, A.A., Hammad, A.E. 2010.** Effects of small addition of Ag and/or Cu on the microstructure and properties of Sn-9Zn lead-free solders. *Mater. Sci. Eng.*, A 527: 5212-5219.
- El-Daly, A.A., Hammad, A.E. 2010.** Elastic properties and thermal behavior of Sn-Zn based lead-free solder alloys. *J. Alloy. Compd.*, 505: 793-800.
- Fan, J., Li, X., Su, Y., Chen, R., Gou, J., Fu, H. 2011.** Dependency of microstructure parameters and microhardness on the temperature gradient for directionally solidified Ti-49Al alloy. *Mater. Chem. Phys.*, 130: 1232-1238.
- Fan, J., Li, X., Su, Y., Guo, J., Fu, H. 2010.** Dependency of microhardness on solidification processing parameters and microstructure characteristics in the directionally solidified Ti-46Al-0.5W-0.5Si alloy. *J. Alloy. Compd.*, 504: 60-64.
- Fan, J., Liu, J., Tian, S., Wu, S., Wang, S., Gao, H., Guo, J., Wang, X., Su, Y., Fu, H. 2015.** Effect of solidification parameters on microstructural characteristics and mechanical properties of directionally solidified binary TiAl alloy. *J. Alloy. Compd.*, 650: 8-14.
- Garcia, L.R., Osorio, W.R., Peixoto, L.C., Garcia, A. 2010.** Mechanical properties of Sn-Zn lead-free solder alloys based on the microstructure array. *Mater. Charact.* 61: 212-220.
- Goulart, P.R., Spinelli, J.E., Cheung, N., Garcia, A. 2010.** The effects of cell spacing and distribution of intermetallic fibers on the mechanical properties of hypoeutectic Al-Fe alloys. *Mater. Chem. Phys.*, 119: 272-278.
- Gündüz, M., Çadırılı, E. 2002.** Directional solidification of aluminium-copper alloys. *Mater. Sci. Eng.*, A327: 167-185.
- Hu, X., Li, K., Min, Z. 2013.** Microstructure evolution and mechanical properties of Sn0.7Cu0.7Bi lead-free solders produced by directional solidification. *J. Alloy. Compd.*, 566: 239-245.
- Hung, F.Y., Wang, C.J., Huang, S.M., Chen, L.H., Lui, T.S. 2006.** Thermoelectric characteristics and tensile properties of Sn-9Zn-xAg lead-free solders. *J. Alloy. Compd.*, 420: 193-198.
- Karakurt, F. 2015.** Ag katkılı Sn-ağ.% 9 Zn ötektik alaşımının doğrusal katılaştırılması ve fiziksel özelliklerinin incelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, Niğde Üniversitesi, 86 s.
- Kaya, H., Çadırılı, E., Böyük, U., Maraşlı, N. 2008.** Variation of microindentation hardness with solidification and microstructure parameters in the Al based alloys, *Appl. Surf. Sci.*, 255: 3071-3078.
- Klasik, A., Sobczak, N., Pietrzak, K., Makowska, K., Wojciechowski, A., Kudyba, A., Sienicki, E. 2012.** Relationship between mechanical properties of lead-free solders and their heat treatment parameters. *JMEPEG.*, 21: 620-628.
- Lee, J.E., Kim, K.S., Inoue, M., Jiang, J., Sukanuma, K. 2008.** Effects of Ag and Cu addition on microstructural properties and oxidation resistance of Sn-Zn eutectic alloy. *J. Alloy. Compd.*, 454: 310-320.
- Liu, H.Y., Li, Y., Jones, H. 1998.** Thermal stability of the aZn-Mg₂Zn₁₁ and aZn-bAl eutectics obtained by Bridgman growth. *J. Mater. Sci.*, 33: 1159-1164.
- Osorio, W.R., Garcia, A. 2002.** Modeling dendritic structure and mechanical properties of Zn-Al alloys as a function of solidification conditions, *Mater. Sci. Eng. A.*, 325: 103-111.
- Peng, P., Li, X., Su, Y., Li, J., Guo, J., Fu, H. 2015.** Dependence of microhardness on solidification processing parameters and dendritic spacing in directionally solidified Sn-Ni peritectic alloys. *J. Alloy. Compd.*, 618: 49-55.
- Santos, G.A., Neto, C.M., Osorio, W.R. 2007.** Garcia, A., Design of mechanical properties of a Zn27Al alloy based on microstructure dendritic array spacing, *Mater. Design.*, 28: 2425-2430.
- Shafiq, I., Chan, Y.C., Wong, N.B., Yung, W.K.C. 2012.** Influence of small Sb nanoparticles additions on the microstructure, hardness and tensile properties of Sn-9Zn binary eutectic solder alloy. *J.Mater. Sci.-Mater. El.*, 23: 1427-1434.
- Shalaby, R.M. 2010.** Effect of indium content and rapid solidification on microhardness and micro-creep of Sn-Zn eutectic lead free solder alloy. *Cryst. Res. Technol.*, 45: 427-432.
- Song, J.M., Lan, G.F., Lui, T.S., Chen, L.H. 2003.** Microstructure and tensile properties of Sn-9Zn-xAg lead-free solder alloys. *Scripta Materialia*, 48: 1047-1051.
- Şahin, M. 2012.** İkili ve üçlü metalik alaşımların doğrusal katılaştırılması ve fiziksel özelliklerinin incelenmesi. *Doktora Tezi*, Niğde Üniversitesi, 218 s.
- Wenxue, C., Songbai, X., Hui, W., Yuhua, H. 2010.** Effects of Ag on properties of Sn-9Zn lead-free solder. *Rare Metal Mat. Eng.*, 39: 1702-1706.
- Yan, Y., Ding, H., Kang, Y., Song, J. 2014.** Microstructure evolution and mechanical properties of Nb-Si based alloy processed by electromagnetic cold crucible directional solidification. *Mater. Design*, 55: 450-455.