



## Ag içeren dolgu metalleri ile elde edilen bakır/pirinç lehim bağlantısının mikroyapısı ve mekanik performansı üzerine çalışma

### Study on microstructure and mechanical performance of copper/brass brazing joint with Ag brazing fillers

Gökhan Şafak <sup>1\*</sup>, Simge İrizalp <sup>1</sup>, Burçak Kardelen Köroğlu <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, Manisa, Türkiye  
Sorumlu Yazar / Corresponding Author \*: gokhan.safak@ici.com

Geliş Tarihi / Received: 23.02.2022

Kabul Tarihi / Accepted: 06.06.2022

Araştırma Makalesi/Research Article

DOI:10.21205/deufmd.2022247230

Atıf şekli/ How to cite: ŞAFAK, G., İRİZALP, S., KARDELEN KÖROĞLU, B.(2022). Ag içeren dolgu metalleri ile elde edilen bakır/pirinç lehim bağlantısının mikroyapısı ve mekanik performansı üzerine çalışma. DEÜ FMD 24(72), 1033-1047.

#### Öz

Ag, sert lehim dolgu metallerinde faydalı bir alaşım elementi olarak kullanılır. Ag ilavesinin, dolgu metallerinin erime sıcaklığı, ıslanabilirliği, iletkenliği ve mekanik özelliği üzerinde pozitif bir etkiye sahip olduğu açıktır. Bu nedenle, Ag çok pahalı olmasına rağmen birçok araştırma ve üretimde hala yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmada farklı seviyelerde Ag içeren dolgu metalleri kullanılarak hem dayanımı yüksek hem de uygun maliyetli sert lehim bağlantı elde edilmesine odaklanılmıştır. Farklı seviyelerde Ag-Cu-Zn ve Cd içeren dolgu metalleri ile elde edilen sert lehim bağlantılarının ergime-katılma sıcaklıkları, mekanik özellikleri ve mikroyapıları incelenmiştir. Bu çalışmada, iklimlendirme sektöründe soğutma-ısıtma yapan cihazlarda bakır-pirinç malzeme ikilisi olarak kullanılan borular ve kapakların sert lehimleme işlemlerinde uygun Ag içeriği detaylı olarak araştırılmıştır. Bağlantıların tipik mikroyapısı incelendiğinde, esas olarak katı çözeltiler ve ötektik fazlardan oluştuğu görülmüştür. Bakır ve pirinç bölgelerindeki arayüzeyler hem Ag içeriğinden hem de ergime sıcaklıklarından etkilenmiştir. Sert lehimlenmiş malzeme çiftlerinin patlatma testi ile hasara uğradığı gerilme değeri maksimum 345 MPa olarak bulunmuştur ve hasarın bakır boruda oluştuğu raporlanmıştır. Bunun yanında hiç Ag içermeyen lehim teli kullanıldığında nihai ürünün lehim bölgesinden hasara uğradığı raporlanmıştır. Düşük Ag içeriğine sahip sert lehim bağlantısının dayanımının bakır borudan daha yüksek olması sebebiyle nihai üründe %5 Ag içeriğinin yeterli performansı sağladığı bulunmuştur. Sonuçlar, ayrıca, Ag ilavesinin artmasıyla mikrosertliğin arttığını, % 5Ag içeren metalle elde edilen bağlantının sertliğinin %21 artış göstermiş, %40 Ag içeren metalle elde edilen bağlantı sertliğinin %57' ye varan bir artış sergilemiştir. Bu da Ag ilavesinin dayanımı iyileştirdiğini ancak, %5 gibi bir oranda içermesinin lehim bağlantısında yeterli performansı sağladığını göstermiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Sert lehimleme, Ag içeriği, Mikroyapı, Mekanik özellikler

#### Abstract

Ag is used as a useful alloying element in brazing filler metals. It is clear that the addition of Ag has a positive effect on the melting temperature, wettability, conductivity and mechanical property of the filler metals. For this reason, although Ag is very expensive, it is still widely used in many research and production. In this study, it was focused on obtaining both high strength and cost-effective brazing joints by using filler metals containing different levels of Ag. Melting-solidification

temperatures, mechanical properties and microstructures of brazing joints obtained with filler metals containing different levels of Ag-Cu-Zn and Cd were investigated. In this study, the appropriate Ag content in brazing processes of pipes and caps used as copper-brass material pairing in cooling-heating devices in the air conditioning system was investigated in detail. When the typical microstructure of the joints was examined, it was observed that it mainly consisted of solid solutions and eutectic phases. The interfaces in the copper and brass regions were affected by both Ag content and melting temperatures. As a result of the burst test, the maximum stress value at which the brazed material pairs were damaged was found to be 345 MPa, and the damage was reported to occur in the copper pipe. In addition, it has been reported that the final product is damaged from the brazed zone when Ag-free solder wire is used. It was found that 5%Ag content provides sufficient performance in the final product due to the fact that the strength of the braze joint with low-Ag content is higher than the copper tube. The results also showed that the micro-hardness increased with the increase of Ag-addition, the hardness of the joint with the filler metal containing 5%Ag increased by 21%. The joint hardness obtained with filler metal containing 40% Ag showed an increase of up to 57%. This showed that the addition of Ag improves the strength, but its 5% Ag content provides sufficient performance in the brazing joint.

**Keywords:** *Brazing, Ag content, Microstructure, Mechanical properties*

### 1. Giriş

Lehimleme, bir dolgu metali yardımıyla farklı malzemeleri birleştirme prosesidir. Lehimleme, proses esnasında kullanılan dolgu metalinin ergime sıcaklığı üstüne çıkılarak yapılan bir işlemdir. Proseste dikkat edilmesi gereken husus ana malzemenin ergime sıcaklığını aşmamaktır. Sert lehimleme dolgu metalinin ergime sıcaklığının 450°C derecenin üstünde olması, darbe-titreşim dayanıklılığı, yüksek parça dayanımı, otomasyona uygunluk, kolay-hızlı uygulanabilirlik, ekonomik oluşu ve estetik görünüm gibi avantajları sebebiyle sıkça tercih edilmektedir[1]. Ayrıca yöntemin en önemli özelliklerinden biri uyumsuz ve farklı karakterdeki malzemelerin birleşimini sağlayabilmesidir[2]. İşlemin basitliği, boyut ve uyum sağlayabilmesi nedeniyle, bakır, yumuşak çelik, paslanmaz çelik ve diğer alaşımların birleştirilmesinde sert lehimin yaygın olarak uygulanmasını sağlar[3-5]

Geçmişten günümüze iklimlendirme, elektrik elektronik, otomatik, uzay, havacılık sektörlerinde çokça tercih edilmektedir[4-7]. Kaliteli lehim bağlantıları üretmek için, dolgu metalinin doğru seçimi, belirli ana malzemelerin doğru bir lehimleme tekniği ile lehimlenmesinde en önemli unsurlardan biridir. Dolgu metalinin ana malzemelere uygunluğu için bazı değerlendirme kriterleri vardır. Kompozisyonlar, sıvı sıcaklığı, erime aralığı, termal genleşme katsayısı ve dolgu maddesinin ıslatılabilirliği gibi dolgu metallerinin özellikleri ana malzemelerle uyumlu olmalıdır[8,9].

Sert lehim dolgu metalleri arasında, Ag esaslı dolgu metalleri, yüksek mukavemetleri, elektrik iletkenliği, termal iletkenlik ve oksidasyon dirençleri nedeniyle alüminyum ve magnezyum hariç alaşımları birleştirmek için tercih edildiği bilinir [10].

Ag esaslı lehimleme metalleri havacılık, otomobil, inşaat vb. endüstrilerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Ag içeren lehim metalleri ve lehimler, lehimleme teknolojisi için son derece önemli malzemelerdir, çünkü erime sıcaklıkları lehim için elverişlidir, ayrıca ıslanabilirlikleri, iletkenlikleri ve mekanik özellikleri de mükemmeldir. Bu nedenle, hemen hemen tüm demir esaslı ve demir dışı metaller Ag içeren lehimler ve sert lehim metalleri tarafından lehimlenebilir[11]. Ag esaslı dolgu metalleri ailesinde, Cd içeren Ag esaslı dolgu metalleri havacılık, güç elektroniği ve ev aletleri endüstrilerinde onlarca yıldır yaygın olarak kullanılmaktadır. Ag - Cu - Zn - Cd sistemi, son derece düşük katılma sıcaklığı ve mükemmel akışkanlık nedeniyle yaygın olarak kullanılmıştır[12,13].

Bununla birlikte, Cd' un doğal toksisitesinden dolayı, AB, ABD, Japonya ve Çin'deki elektrikli ekipman endüstrileri, elektrikli ve elektronik ekipmanda Cd içeren dolgu metallerinin kullanımını sınırlamıştır. Özellikle elektrikli ve elektronik ekipmandan kaynaklanan atıklar ve belirli tehlikeli maddelerin kullanımının kısıtlanması Avrupa'da dikkatlice uygulandığından, geleneksel Pb ve Cd içeren dolgu metallerinin uygulanması

kısıtlanmaktadır[13-15]. Bu, dünya çapında, Ag içeren lehimlerin ve sert lehim dolgu metallerinin şimdiye kadar en çok ilgiyi çektiği ikame ürünlerin arayışıyla sonuçlanmıştır[7]. Bunun yanında, Ag' nin yüksek fiyatı, Ag bazlı dolgu metallerinin daha fazla uygulanmasını da kısıtlamaktadır [14]. Sonuç olarak, Ag esaslı dolgu metallerinin özelliklerinden ödün vermeden Ag içeriğini azaltmak birçok araştırmacı için ilgi konusu olmuştur[10]. Yapılan çalışmalarda araştırmacılar farklı dolgu telleri ile çalışarak en uygun ve kaliteli birleşmeyi bulmayı hedeflemişlerdir. Sert lehim alanında toksik etkiye sahip Pb ve Cd içermeyen, Ag esaslı sert lehim alaşımları, havacılık, güç elektroniği ve ev aletleri endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu tür dolgu metallerinin iki önemli temsilcisi vardır: Ag - Cu - Zn ve Ag - Cu - Zn - Sn alaşımları. Vianco [16], Reid [17], Song [10] yaptıkları çalışmalarda Ag esaslı dolgu metallerinin sert lehim özelliklerini olumlu etkilediği bildirilmiştir. Ag esaslı dolgu metaliyle ilgili önceki araştırmalar, bir dizi Cd içermeyen Ag esaslı dolgu metalinin geliştirilmesiyle sonuçlanmıştır. Az miktarda Ga ve In eklendiğinde olumlu sonuçlar elde edildiği de raporlanmıştır[18]. 30AgCuZnSn dolgu metalinin termal ve mekanik özellikleri iyileştirdiği, ancak 30AgCuZnSn dolgu metalinin Ag içeriğinin hala yüksek oranda bulunduğu bu sebeple yüksek maliyete sahip olduğu görülmüştür[10].

Zaharinie vd.[14] araştırmalarında sert lehimleme uyguladıkları bakır malzemelerin yüzey pürüzlülüğünü incelemişler ve bunun için optimum parametreleri bulmayı hedeflemişlerdir. Çalışmanın sonucunda lehimlemenin gerçekleştiği bölgede gaz boşlukları tespit edilmiş ve bu oluşan boşlukların alaşım içeriğindeki Cu, Sn ve P oranlarının lehim kalitesindeki değişimi etkilediğini raporlamışlardır. Shabtay vd.[15] bakır ve pirinç malzemelerinin sert lehimde mukavemetlerini değerlendirmiş, mukavemet kaybının sıcaklıkla değişimini incelemişlerdir.

Chakravarty ve Gupta tarafından Fe ve Ag-Cu-Sn dolgu metali arasındaki intermetalik oluşumu araştırılmıştır[19]. Çınar S. [20] bakır ve alaşımlarının sert lehimlenme işleminde farklı dolgu telleri kullanılması sonucu mikroyapısal ve mekanik etkilerini incelemişlerdir. Ag ilavesi sonucunda dendritik yapının tane incelmesine sebep olduğunu ve farklı dolgu teli ile yapılan

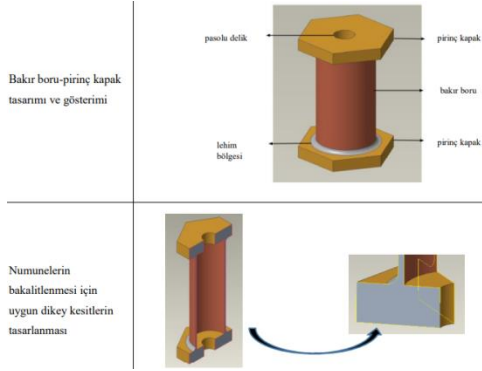
birleştirme işlemlerinde tane morfolojisinde değişimler gözlemlenmiştir.

Bakır ve pirinç alaşımlarının yüksek ısı iletkenliği ve yüksek mukavemeti, hafiflik, dayanıklılık, düşük maliyet ve verimlilik, özellikle ısı eşanjörleri için arzu edilen özelliklerdir. Pirinç boru ve bakır kanatlı alaşımlar, yüksek çalışma sıcaklıklarında iyi dayanım sunar. Bu durum bakır ve pirinç her şekil ve boyuttaki radyatörler, ısıtıcılar ve şarj havası soğutucuları için bir kez daha son derece kullanışlı hale getirmektedir[15].

Bu çalışma iklimlendirme sektöründe kullanılan soğutma-ısıtma yapan cihazlarda bakır-pirinç malzeme ikilisi olarak kullanılan borular ve kapakların sert lehimleme ile birleşiminde Ag katkılı dolgu metalinde Ag miktarının değiştirilmesi sonucu yüksek mukavemet ve düşük maliyeti birleştirmeyi amaçlamaktadır. Sert lehimleme ile birleştirilen bakır-pirinç, pirinç-pirinç malzemelerin lehimleme esnasında kullanılan dolgu metalindeki Ag içeriğinin değiştirilmesi ile hem dayanımı yüksek hem de uygun maliyetli bir birleştirme elde edilmesi hedeflenerek farklı Ag seviyelerine sahip dolgu metallerinin etkileri tartışılmıştır.

## 2. Materyal ve Metod

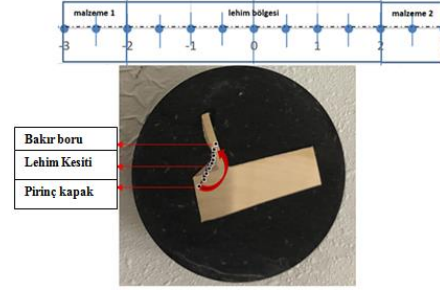
Bu çalışmada ana metal olarak bakır-pirinç ikilisi kullanılmış ve 5 farklı dolgu teli ile birleştirme uygulanmıştır. Lehimlemeye etki eden hız ve sıcaklık parametreleri sabit tutularak dolgu metalinin içeriğinin lehimlemeye etkisi araştırılmıştır. Lehimleme operasyonu ortalama 2 dakika ve 850°C' de gerçekleştirilmiştir. Lehim dolgu tellerine spektral analiz ve 10°C/dak sıcaklık artış hızında azot gazı altında DSC&TGA analizleri yapılmıştır. Kullanılan dolgu metallerinin değişken Ag yüzdeleri %0, %4.8, %6, %30 ve %40 şeklindedir. Dolgu telleri ve kimyasal kompozisyonları Tablo 1' de verilmiştir. Boruların hem alt ve hem üst kısımları kapak ile kapalı olacak şekilde lehimlenmiştir. Bakır boru ve pirinç kapaklarının lehimleme sonrası katı model montaj görüntüleri Şekil 1' de görülmektedir. Ana metal olarak kullanılan bakır boru malzemesinin kimyasal kompozisyonu %99,978 Cu ve %0,0189 P' dur. Pirinç kapak malzemesinin kimyasal kompozisyonu ise %59,5 Cu, %40Zn ve diğer<%0,5 şeklindedir.



**Şekil 1.** Bakır boru-pirinç kapak tasarımının katı modellemesi

Sert lehimleme işlemi öncesi bakır boru ve pirinç kapakların temizliğinde solvent kullanılarak kalıntı, yağ ve pas gibi tüm kirliliklerden arındırılmıştır. 30 s süre ile oksijen-asetilen gaz üfleci ile numunelere ön ısıtma uygulanmıştır. Ardından lehimleme operasyonları belirtildiği şekilde gerçekleştirilmiştir. Lehimle birleştirilmiş parçalar mikroskobik incelemeler için metalografik olarak hazırlanmış ve 1 g FeCl<sub>3</sub>, 2ml HCl ve 100ml CH<sub>3</sub>CH<sub>2</sub>OH çözeltisi kullanılarak dağlanmış ve metalografik olarak hazırlanmış örnek numune Şekil 2' de sunulmuştur. Optik mikroskop (OM) ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) incelemeleri ve EDX analizleri yapılmıştır. Yine Şekil 2' de mikrosertlik ölçüm hattında gösterilmiştir. Mikrosertlik ölçümleri 100 gf yük altında 0.5 mm mesafe ile vickers indenter yardımıyla gerçekleştirilmiştir.

Sert lehimin mekanik performansını araştırmak amacıyla patlatma testi uygulanmıştır. Numuneleri düzeneğe bağlayabilmek için lehimleme prosesi öncesi kapaklar üzerine 7x7mm NPT (National Pipe Taper) diş açılmıştır. Düzeneğin bağlantı ucuna uygun bağlantı hazırlanarak montajlanmıştır. Test esnasında FULHYDRO HLP 10 hidrolik sistem yağı kullanılmıştır.



**Şekil 3.** Sert lehimlemeden alınan kalıplanmış numunenin enine kesit fotoğrafı ve mikrosertlik ölçüm hattı

### 3. Bulgular ve Tartışma

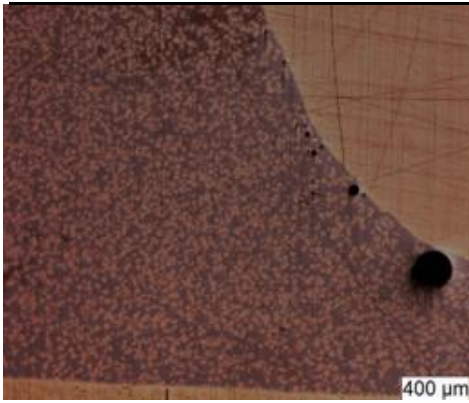
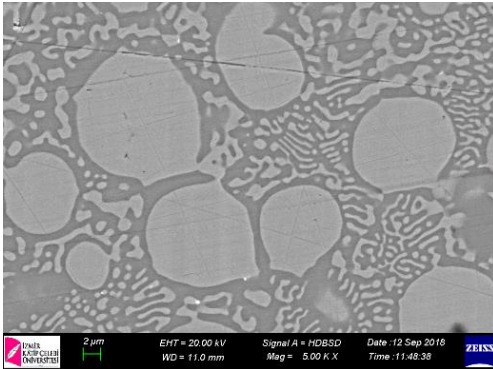
Spektral analiz sonrası lehim tellerinden elde edilen detaylı kimyasal kompozisyonları ve DSC&TGA analizlerinden elde edilen likidüs ve solidüs sıcaklıkları Tablo 2' de verilmiştir.

#### 3.1.Mikroskobik incelemeler

4 farklı dolgu teliyle birleştirilmiş bakır boru-pirinç kapak lehim bağlantı numunelerinin OM ve SEM görüntüleri incelenmiştir. Şekil 4 de No#1 dolgu teli kullanılan numunelerin lehimlenmiş bölgelerinin hem OM hem SEM görüntüleri verilmiştir. Ag ilavesiz olan bu tel ile yapılan lehim işleminden sonra bakır ve pirinç malzemelerin birleşim bölgesine doğru gaz boşlukları olduğu görülmektedir. No#1 teli ile oluşturulan bağlantılarda lehim bölgesi mikroyapısı incelendiğinde küresel yapıdaki morfoloji dikkat çekmektedir.

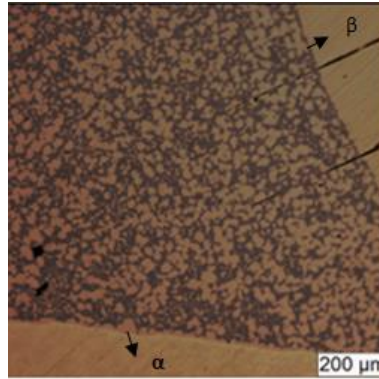
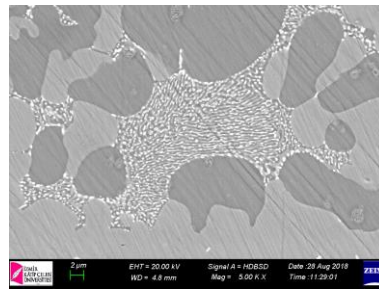
**Tablo 2.** Sert lehimlemede kullanılan dolgu metallerinin alaşım kompozisyonu ve özellikleri [21]

Dolgu Teli	AWS standardı	Kompozisyonlar %							Likidüs Sıcaklık (°C)	Solidüs Sıcaklık (°C)
		Ag	Cu	P	Sn	Zn	Cd	Diğer		
No#1	BCuP-1		94.0-96.0	4.8-5.2				0.15	924	710
No#2	BCuP-3	4.8-5.2	88.0-90.0	5.8-6.2				0.15	720	643
No#3	BAG-2a	29.0-31.0	26.0-28.0			21.0-25.0	19.0-21.0	0.15	710	607
No#4	BAG-28	39.0-41.0	29.0-31.0		1.5-2.5	26.0-30.0		0.15	710	649

**Şekil 4.** No#1 dolgu teli bağlantısı ve arayüzey bölgelerini gösteren OM mikroyapısı**Şekil 5.** No#1 dolgu teli bağlantı bölgesinin SEM mikroyapısı

İçerik olarak %4.8 Ag' ye sahip No#2 dolgu teli ile lehimlenen bakır-pirinç numunelerin lehim bölgeleri Şekil 6 da verilmiştir.  $\beta$  taneleri bakır malzeme ile olan bağlantı bölgesinde birleşim hattı boyunca görülürken,  $\alpha$  taneleri pirinç ile birleşim hattı boyunca görülmektedir. No#2 dolgu telinde

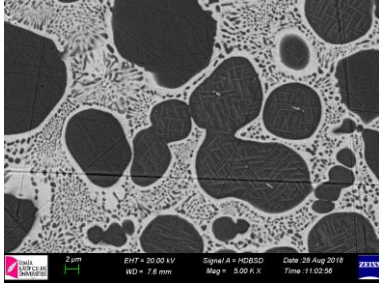
artan Ag ilavesiyle beraber  $\alpha$  tanelerinin rozet yapısına dönüştüğü açıkça görülmektedir.

**Şekil 6.** No#2 dolgu teli bağlantısı ve arayüzey bölgesi mikroyapısı**Şekil 7.** No#2 dolgu teli bağlantı bölgesinin SEM mikroyapısı

%30 Ag ve %20 Cd a sahip No#3 dolgu telinin bakır ve pirinç ile oluşturduğu birleşimin Şekil 8' de SEM görüntüsü verilmiştir. Buna göre, SEM mikroskopunda görüntülenmiş açık renkli ötektik Ag-Cu-Cd-Zn fazları dikkati çekmektedir.

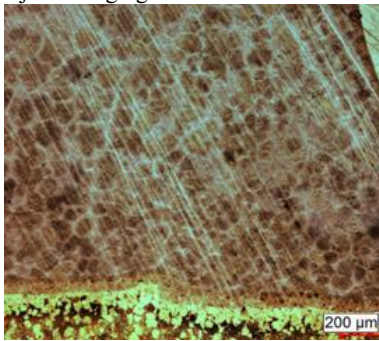


No#2 dolgu teli ile yapılan lehim bağlantısında görülen ötektik içerisindeki parlak renkli Ag' ce yüksek faza No#3 teli ile yapılan bağlantıda rastlanmamıştır. Dikkati çeken çok ince plakamsı fazlar Widmanstatten yapıda oluşmuştur. Ag ilavesi ile dönüşümün gerçekleştiği sıcaklık düşmektedir. Dahası bu aşamda Cd ve Zn yer almaktadır ve bu ikilinin elektronegativiteleri benzerdir[22]. Zn ve Cd arasındaki difüzyon hızlı olurken diğer element atomları ile difüzyonu daha az olacaktır ve bu da daha ince bir mikroyapıyı meydana getirmektedir, bunun yanında katı çözelti boyutunu azaltarak Widmanstatten mikroyapısını oluşturmaktadır. Mikroyapıda, büyük miktarlarda beyaz iğne benzeri fazın dağılımı mevcuttur. Cu esaslı katı çözelti içinde iğne benzeri yapılar oluşabilir[23].

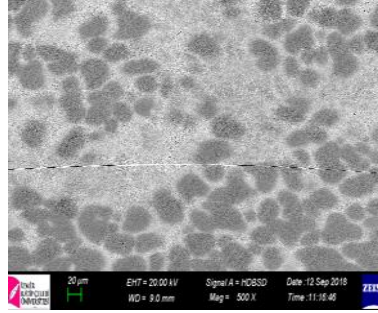


**Şekil 8.** No#3 dolgu teli bağlantı bölgesinin SEM mikroyapısı

%40Ag ilaveli No#4 dolgu teli ile lehimlenmiş bakır ve pirinç malzemelerin OM (Şekil 9) ve SEM görüntüleri (Şekil 10) verilmiştir. Lehim bölgesinin mikroyapısının homojen olarak dağıldığı ve küresel morfolojide olduğu görülmektedir.



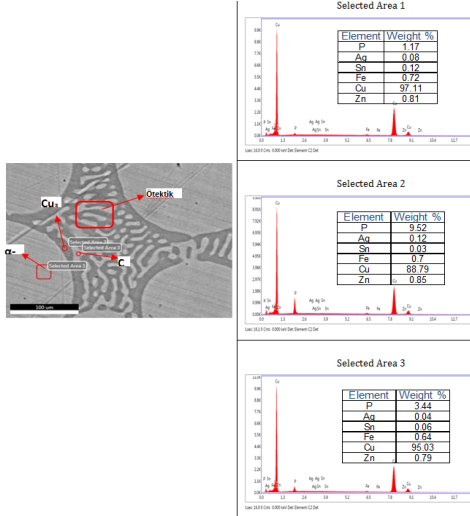
**Şekil 9.** No#4 dolgu teli bağlantısı ve arayüzey bölgesi OM mikroyapısı



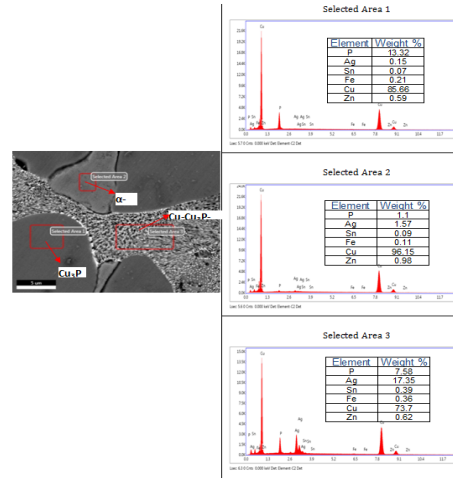
**Şekil 10.** No#4 dolgu teli bağlantısının SEM mikroyapısı

No#1 Ag bulunmayan dolgu teli ile gerçekleştirilen bağlantının EDX incelemesi sonucu açık renkli küresel fazların  $\alpha$ -Cu, koyu kontrastlı lamelli yapının ise Cu+ Cu<sub>3</sub>P ötektiği, lamelli ötektik yapıdaki açık renkli fazın Cu iken koyu renkli fazın ise Cu<sub>3</sub>P olduğu bulunmuştur. Faz isimleri Şekil 11' de sunulmuştur. Lehim operasyonu sonrası bakır boru, bağlantı bölgesi ve pirinç kapak boyunca gerçekleştirilmiş çizgi analizi sonuçları Şekil 12' de görülmektedir. Bakır boru kesitinde yalnızca kırmızı rengin temsil ettiği Cu elementi görülürken, beklendiği üzere birleşim bölgesinde Cu oranının azaldığı ve P elementinin oranında artış olduğu görülmüş, pirinç bölge incelendiğinde ise Cu oranındaki azalma ve Zn oranında artış göze çarpmaktadır. Pirinç bölgeye yapılan incelemede ise P elementine rastlanmamıştır.

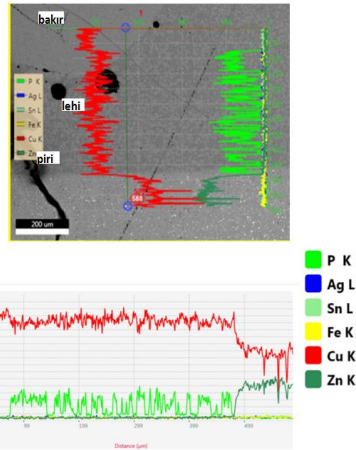
No#2 dolgu teli bağlantısına yapılan EDX çizgi analizi sonucu Şekil 13' de verilmiştir. Bakır boru kesitinde sadece Cu elementi yani kırmızı renk gözlemlenirken, birleşim bölgesinde bu Cu oranının azaldığı ve Ag ve P oranlarında artış olduğu görülmektedir.



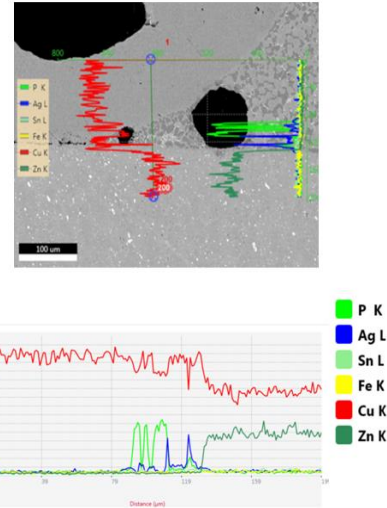
Şekil 11. No#1 dolgu teli bağlantısının EDX analizi



Şekil 13.No#2 dolgu teli bağlantısında EDX incelemeleri



Şekil 12. No#1 dolgu teli bağlantısının çizgi analizi

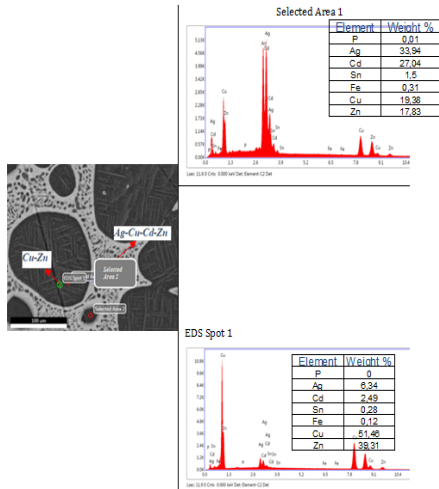


Şekil 14. No#2 dolgu teli bağlantısının çizgi analizi

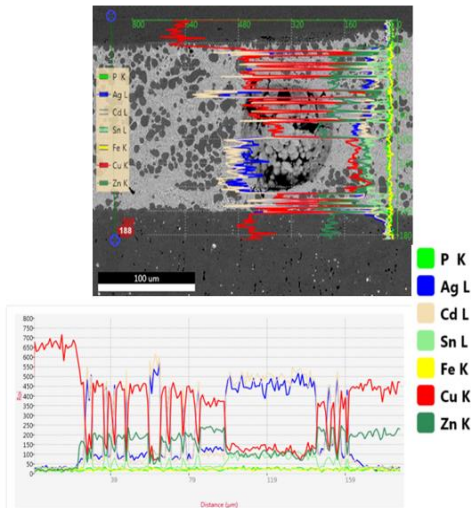
Pirinç olan bölgeye ilerlendiğinde Cu oranında oluşan azalma ile Zn miktarında artış meydana gelmiştir. SEM ile yapılan morfolojik inceleme sonucunda faz yapıları açıkça ayırt edilmektedir. Şekil 13’ de yer alan fazlar incelendiğinde, açık gri renkli iri rozet şekilli  $\alpha$ -Cu taneleri, ince lamelli ötektik yapı ve koyu renkli gri  $\text{Cu}_3\text{P}$  fazı görülmektedir. Beyaz renkli fazlar Ag, ötektik yapı  $\text{Cu-Cu}_3\text{P-Ag}$  fazına aittir. Literatürde yapılan çalışmalarda benzer şekilde mikroyapılar, gri faz, açık gri faz ve lamelli faz olmak üzere üç tür fazda kategorize edilmektedir[13].

Noktasal ve çizgisel analizi yapılan No#3 dolgu teli ile lehimlenen bağlantının sonuçları Şekil 15 ve 16’ da sunulmuştur. Nodüler morfolojili açık renkli ötektik yapı  $\text{Ag-Cd-Cu-Zn}$  fazıdır. Küresel forma sahip koyu renkli faz ise Cu ve Zn içeren katı çözeltili iken, koyu gri Cu taneleri içerisinde kılcal-İğnemsilamelli Cu-Zn içeriği görülmektedir. İğnemsilamelli morfolojideki yapı EDX nokta analizi ile incelendiğinde Ag ve Cd içerdiği tespit edilmiştir. Literatürde de sert lehim dikişinde küçük miktarlarda iğne benzeri yapıların ortaya çıktığı

kaydedilmiştir[23]. Açık renkli ötektik faz içerisinde Ag-Cd içerikleri artarken, Cu-Cd ikilisinin azaldığı görülmüştür. Lehim bölgesinde koyu gri olarak görünen bölgeler incelendiğinde Ag-Cd azalırken Cu-Zn ikilisi artış göstermiştir. Pirinç kapağa gelindiğinde içerikteki Ag ve Cd oranı azalırken Cu oranında artış meydana gelmektedir. Dolgu metali ve ana malzeme arasındaki arayüz düzensiz hale gelebilmektedir, bu da ana malzemede tane sınırı boyunca Ag ve Cu difüzyonu yoluyla oluşturulmaktadır[23].

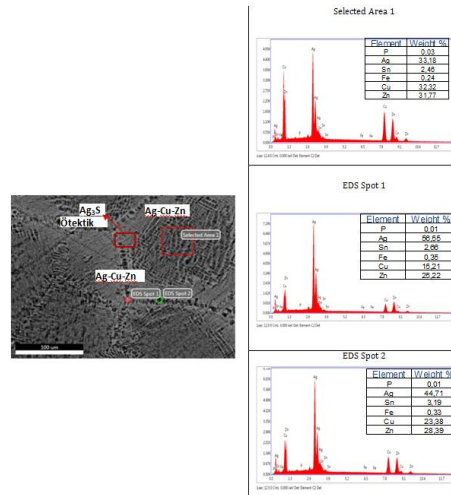


Şekil 15. No#3 dolgu teli bağlantısının EDX analizi



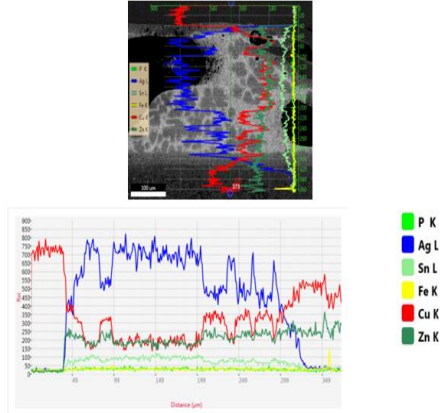
Şekil 16. No#3 dolgu teli bağlantısında çizgi analizi

No#4 dolgu teli ile lehimlenen metal çiftinin lehim bölgesine EDX nokta analizi yapılmış ve Şekil 17' de verilmiştir. Bu lehim bölgesinde oluşmuş olan mikroyapı oldukça ince yapılı gri ve koyu gri kontrastta iki fazdan oluşmaktadır. Ötektik faz ( $Ag_3Sn$ ) açık renkli gümüşçe zengin kısımda oluşmuştur. Ag oranının düşük olduğu faz ise koyu renk ile gösterilmiştir. Bağlantının SEM mikroyapısında son derece yüksek oranlı büyütmelere rağmen ötektik yapıyı ayırt etmek, artan gümüş miktarı ile küçülen/iğneleşen tane yapısından dolayı güçleşmiştir. No#4 dolgu teli ile lehimlenen bağlantıya çizgi analizi yapılmış ve Şekil 18' de gösterilmiştir. Lehimlenen bölgede genel olarak Ag elementi diğer elementlere göre daha yüksek orandadır. Açık renkli kısımda ötektik fazda  $Ag_3Sn$  görülürken, koyu küresel formlarda ise Cu-Zn ikinci fazı artış göstermektedir. Lehimin pirinç kapağa yaklaştığı kısımda ise içerikteki Ag oranı azalmakta ve Cu oranı artış göstermektedir.



Şekil 17. No#4 dolgu teli kullanılan bağlantıda EDX analizi





**Şekil 18.** No#4 dolgu teli bağlantısında çizgi analizi

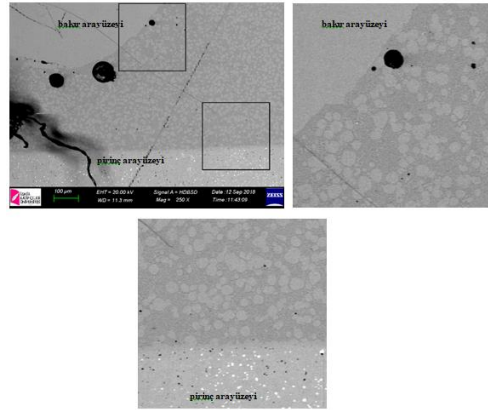
Bilindiği gibi, reaksiyon tabakası, lehimli bağlantıların mukavemetinde önemli bir rol oynamaktadır[24]. Pirinç kapak-bakır boru çiftine farklı kompozisyondaki tellerle yapılan lehimleme sonrasında ana metal ile lehim dolgusu arasında oluşan reaksiyon tabakası olarak adlandırılan bölge 4 farklı dolgu telinde de farklı tabaka oluşturmuştur. Ag ve diğer eklenen elementlerin etkisiyle oluşan yeni fazlarda metallerarası bileşiklerin meydana geldiği görülmüştür. No#3 ve No#4 tellerinde oluşum gösteren Ag-Zn ve Ag-Sn fazlarının dispersiyonu matris yapısını incelterek lehim bölgesinin mekanik özelliklerini geliştirmektedir [24]. Ag ilavesinin bağlantı arayüzlerine etkileri Şekil19-22 arasında verilmiştir. Tablo 3' de bakır boru ara yüzey kalınlıkları verilmiştir. Tüm pirinç arayüzlerinde reaksiyon tabakası oluşmuştur. Fakat bakır arayüzlerinde No#1 yani Ag içermeyen dolgu teli kullanıldığında reaksiyon tabakasına rastlanmamıştır. Bakır ile oluşan arayüzlerde Ag oranı arttıkça arayüzey tabakasının oluşmaya başladığı ve artan oranla giderek büyüdüğü gözlemlenmiştir.

Bileşik fazların dağılımı bağlantı mukavemetini oldukça etkilemektedir [24,25]. Yapılan çalışmalar ışığında farklı araştırmacılar yüksek Ag içeriğine sahip dolgu metalleriyle yapılan lehimlerde, mekanik bakımdan üstün performans elde edilmesinin yanında, düşük Ag içeriğine sahip tellerle yapılan lehimlerde termal yorulma deformasyonuna karşı direnç ve deformasyon sönümlemesinin iyi olduğuna dair

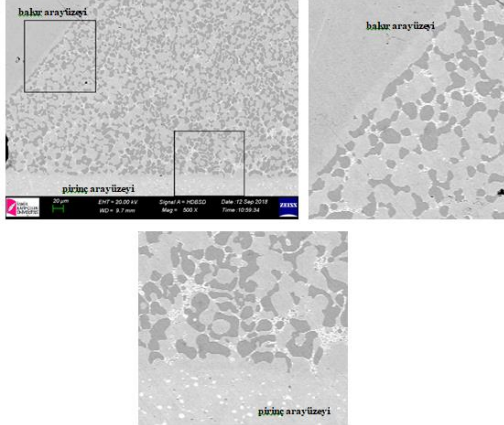
bulgulara da yer vermişlerdir[26]. Cao vd. çalışmalarında çekme testi sonucunda, Ag45CuZnSn dolgu metaliyle bağlantı mukavemetinin, düşük Ag içerikli dolgu metalinden daha düşük olduğunu bulmuşlardır. İğne benzeri yapının oluşmasının bağlantı kalitesini büyük ölçüde etkilediğini raporlamışlardır ve bu durum söz konusu yapının oluşum mekanizmasının araştırılmasını gerekli ve anlamlı kılmaktadır. Hem soğuma işlemi de çökeltme hem de ötektik fazda katılma bu yapının oluşmasına neden olabilmektedir[23]. Araştırmacılar güçlü lehim bağlantıları için en uygun yapının metallerarası bileşik arayüzey tabakasının çok kalın olmadığı ve düz bir morfolojiye sahip optimize edilmiş Ag oranıyla ulaşıldığını raporlamıştır[7]. Özellikle, No#2 dolgu metalinde Şekil 20' de ince ve düz yapıyı arayüzeyin oluştuğu görülmektedir. Görüldüğü gibi bağlantı mukavemetini etkileyen çokça faktör bulunmaktadır.

**Tablo 3.** Bakır-Pirinç Bağlantıda Dolgu Tellerine Göre Ara Yüzey Kalınlığı

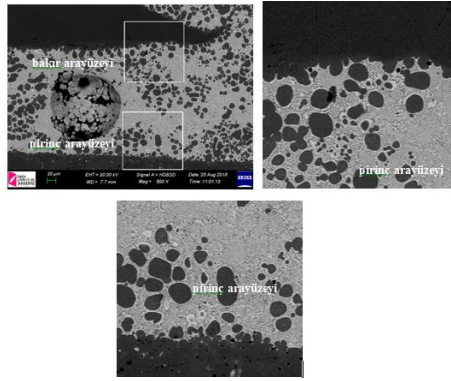
Dolgu Teli No	Bakır Ara Yüzey Tabakası
1	yok
2	8µm
4	21µm
5	70µm



**Şekil 19 .** No#1 dolgu teli kullanılarak elde edilen bakır ve pirinç bağlantılarının arayüzey morfolojileri



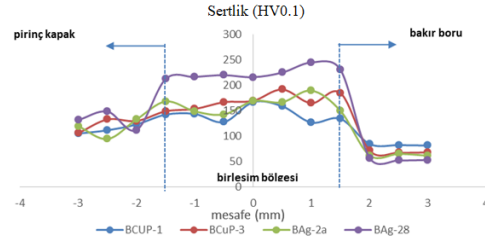
**Şekil 20.** No#2 dolgu teli kullanılarak elde edilen bakır ve pirinç bağlantılarının arayüzey morfolojileri



**Şekil 21.** No#3 dolgu teli kullanılarak elde edilen bakır ve pirinç bağlantılarının arayüzey morfolojileri

### 3.2. Mikro Sertlik

Sertlik ölçümü pirinç kapak, lehim bölgesi ve bakır boru hattı boyunca gerçekleştirilmiştir (Şekil 23). Pirinç kapaktan birleşim bölgesine ilerlendiğinde sertlik değeri artış göstermekte olup, bakır boru kesitinde bu değer azalmaktadır.



**Şekil 23.** Pirinç kapak-bakır boru lehim bağlantısı mikrosertlik grafiği

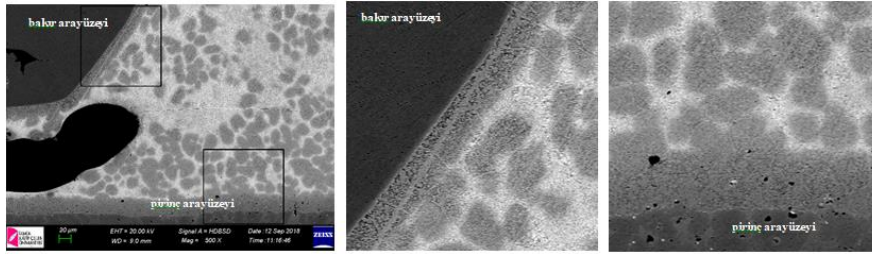
Lehimleme işlemlerinin sonucunda 4 farklı dolgu metaliyle yapılan birleştirmelerin sertlik ölçümlerinde birleşim bölgesinin sertliği ana metal sertliğinden yüksek olduğu bulunmuştur. Pirinç kapak bölgesi ortalama sertliği 120.8 HV, lehim bölgesi ortalama sertliği 174 HV, bakır boru kesiti ortalama sertliği ise 67.5 HV' dir.

No#1 (Ag ilavesiz) dolgu metali ile lehimlenen numunenin lehim bölgesi ortalama sertliği 143 HV, %4.8Ag içeren No#2 dolgu metali ile lehimlenen numunenin lehim bölgesi ortalama sertliği 168 HV, %30Ag,%20Cd içeren No#3 dolgu metali ile lehimlenen numunenin lehim bölgesi ortalama sertliği 162 HV, %40Ag içeren No#4 dolgu metali ile lehimlenen numunenin lehim bölgesi ortalama sertliği 224 HV olarak ölçülmüştür. No#4 dolgu metali ile lehimlenmiş lehim bölgesinin sertliği diğer numunelere göre oldukça yüksektir. Şekil 22 incelendiğinde No#4 dolgusundaki son derece ince ötektik yapı göze çarpmaktadır, oluşan yüksek sertlik bu yapıyla açıklanabilmektedir. En sert değer Ag element miktarının %40 olduğu teldir ve artan Ag oranı ile birlikte sertlik değeri 300 HV' ye kadar artış göstermiştir. Değerin bu şekilde artışı ile mekanik dayanım arasında ilişki kurulabilmektedir[11].

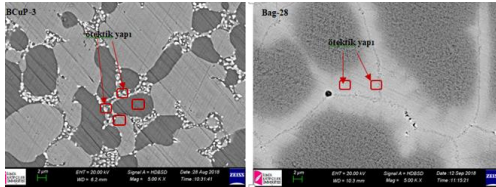
Şekil 24' de görülen dolgu tellerinde dendritik Cu ve Cu-P fazlarının ek olarak Cu-P-Ag ötektik fazları bulunmaktadır. Ag ilavesi sayesinde Cu<sub>3</sub>P kırılgen fazlar azalmıştır. Ag ilavesinin artması ile Zn içeren dolgu metallerinin mekanik özellikleri artmıştır. Bu artışın sebebi Ag ve Zn arasındaki elektronegatifliğin büyüklüğü ile açıklanabilir. Katı çözelti boyutunu azaltmak için difüzyon hızını düşürmek hedeflenir, bu da Zn içeren sert lehim dolgu metallerine Ag ilavesi ile sağlanmaktadır[27]. Yapıda Zn-Cd ikilisinin aynı anda bulunması halinde mekanik özelliklerde yaşanan artış, %40 Ag içeren Cd içermeyen tel kadar belirgin olmamıştır bu durum benzer

atom yapılarına sahip Cd ve Zn ikilisinin elektronegativitelerinin küçük olması ile açıklanabilir. Zn ve Cd atomlarının arasında oluşan hızlı difüzyonun sonucu No#3’ deki sertlik artışı No#4 dolgu tellerindeki kadar belirgin değildir. Araştırmacılar, Ag-Cu-Zn-Cd alaşımlarındaki Cd’ un daha çevre dostu başka bir elementle değiştirilmesi olduğunu belirtmektedirler. Bu nedenle, bu alaşımların ikame maddelerinin geliştirilmesine yönelik çalışmalar, özellikleri nedeniyle Cd’ un yerini almaya en uygun gibi görünen Sn ilavesiyle Ag-

Cu-Zn grubu alaşımlarının yeni konfigürasyonları ile yürütülmeye devam etmektedir [28].



Şekil 22. No#4 dolgu teli kullanılarak elde edilen bakır ve pirinç bağlantılarının arayüzey morfolojileri



Şekil 24. No#2 (BCuP-3) ile No#4 (BAG-28) dolgu metali kullanılan bağlantıların aynı büyütmadaki mikroyapısı

### 3.3.Patlatma testi

Patlatma testi sırasında numunelere kademeli olarak artan yağ basıncı 450 bara kadar uygulanmıştır. Bu test, lehim kalitesini ölçmek, lehimlenen bölgelerde dolgu tellerinin etkisini anlamak amacıyla gerçekleştirilmiştir. Wang vd.[7] çalışmaları sonucunda Ag oranı %0.5’ e gelinceye kadar çekme dayanımı bir azalma göstereceği % 0.5’ den fazla Ag ilavesi sonucunda çekme dayanımının sürekli bir artış gösterdiğini kanıtlamışlardır. Ek olarak Ag ilavesi ile birlikte mekanik dayanımda meydana gelen artıştan bahsetmişlerdir. Vamadevan vd.[29]

iklimlendirme sektöründe sıklıkla tercih edilen borular için von Mises gerilme ve iç basınç değerleri arasındaki ilişki için aşağıdaki bağıntıyı kullanmışlardır:

$$\sigma = \frac{\sqrt{3}}{2} P_i \left( \frac{D}{t} + 1 \right) \quad (1)$$

“ $\sigma$ ” von Mises gerilme değeri, “ $P_i$ ” boru iç basıncını, “ $D$ ” borunun iç çapını ve “ $t$ ” de et kalınlığıdır. Bu eşitlik kullanılarak patlama anında oluşan basınç değerleri ve hasar gerilmeleri hesaplanmıştır. Hesaplamalarda, bakır boru kesitinde boru et kalınlığı “ $t$ ” 1mm ve boru iç çapı D “20mm” olarak alınmıştır. Alaşımı Ag içermeyen No#1 dolgu metali ile lehimlenen bölgede kopma gerçekleşmiştir. Eşitlik (1) ile hesaplanan gerilme değeri 281.8MPa’ dır. numunede 155 bar basınç altında lehim Alaşımı %4.8Ag olan No#2 dolgu metali ile lehimlenen numunede 190 Bar basınçta bakır boru yırtılmıştır. Eşitlik (1) kullanılarak hesaplanan gerilme değeri 345.5MPa’ dır. Alaşımı %6Ag olan No#3 dolgu metali ile lehimlenen numune 190 Bar basınçta bakır borudan yırtılmıştır. Eşitlik (1) ile hesaplanan gerilme değeri 345.5MPa’ dır.



Bu değerler son derece yüksek dayanım değerleri olduğundan daha büyük Ag değerleri için test yapılmasına gerek görülmemiştir. Çünkü artan Ag ilavesi ile birlikte son derece yüksek dayanıma sahip lehim bölgesi değil hasar artık görece daha düşük dayanımlı bakır malzemede meydana gelmektedir. Bu sebeple No#2 ve No#3' de benzer değerler bulunmuştur. Patlatma testi uygulanan lehim tellerinin literatürde yer alan kopma dayanımı değerleri de Tablo 4' de patlatma testi sonuçları ile birlikte özetlenmiştir.

**Tablo 4.** Dolgu tellerinin hasar gerilme değerleri ve literatürde yer alan kopma dayanım değerleri

Tel No	Dolgu Teli	Kopma Dayanımı	Patlatma testi sonucu
1	BCuP-1	250MPa	281.8MPa
2	BCuP-3	439MPa	345.5MPa

Patlatma testi sonuçlarına göre bakır-pirinç lehimlenmesinde %4.8Ag kullanımının yeterli olduğu düşünülmektedir. Fazla Ag kullanımının maliyeti arttırması sebebiyle, bu çalışmada, mekanik dayanım açısından %4.8 Ag oranının kullanımının uygun olduğu düşünülmektedir. Lie vd.[30] çalışmalarında Cu41Sn11 ve Ag3Sn' nin kırılma fazları, Sn içeriği aşırı derecede yüksek olduğunda lehim dikişinde ortaya çıkmıştır. Sert lehim dikişindeki iğneye benzer katı çözeltilerin AgCuZnSn dolgu metalindeki Sn ilavesi arttıkça arttığı gösterilmiştir; sonuç olarak, lehimli birleştirmenin gerilme mukavemetini azalttığını bulmuşlardır[31,32].

**Tablo 5.** Patlatma testi sonuçları

Dolgu Teli No	Dolgu Teli Ag Oranı	Kopma Basıncı	Hasar Gerilme değeri	Hasar durumu	Test Sonrası numune görüntüsü
No#1	%0Ag	155 Bar	281.8MPa	lehim yerinde yırtılma	
No#2	%4.8Ag	190 Bar	345.5MPa	bakır boru üzerinde yırtılma	

Ayrıca bazı araştırmacılar Zn' nin altıgen kapalı yapısı ve kayma düzlemlerinin diğer yapılara göre daha düşük miktarda olması nedeniyle elastisite modülünün atomlar arasındaki bağlanma kuvvetine bağlı olarak değişebildiği sonucuna varmışlardır [20, 33]. Yüzey aktivitesi teorisine göre [10], Sn matrisindeki Zn ve Cu atomları tane sınırlarına doğru göç ederek hareketliliklerini sınırlar ve tane büyümesini engeller. Matristeki sert fazların (metaller arası bileşikler SnSb, Cu3Sn ve Zn'nin altıgen kapalı

dolgulu yapısı gibi) varlığı, malzemeye yüksek mukavemetini verir [35].

#### 4.Genel Sonuçlar ve Öneriler

Ag içeren sert lehim dolgu metallerinin erime-katılaşma sıcaklığı, mekanik özellikleri, işleme kolaylığı gibi avantajlı özellikleri sebebiyle sert lehim dolgu metalleri olarak yaygınca kullanılmaktadır. Fakat uygun Ag oranına ulaşmak için detaylı araştırmalar yapmak

önemlidir, çünkü Ag oranının artması sonucu yükselen maliyet kaçınılmazdır. Bu çalışmada optimum Ag seviyesine ulaşmak için uygun dolgu metali araştırılmıştır. Bu çalışmadan aşağıdaki sonuçlar çıkarılabilir:

1) Cu-P alaşımına düşük oranda yapılacak Ag ilavesi sonucunda tane morfolojisinde dendritimsi form meydana gelmektedir. Yüksek oranda yapılacak Ag eklemesi ise bu tip alaşımları küresel tane yapısı ve ince ötektik yapıya çevirir.

2) Bakır/lehim arayüzeyinde sadece Ag içeren dolgu metallerinde reaksiyon tabakası oluşurken, pirinç/lehim arayüzeylerinde tüm durumlarda reaksiyon tabakası oluşmuştur. Ayrıca reaksiyon tabakasının kalınlaşmasında Ag içeriğinin artışının etkili olduğu bulunmuştur. Reaksiyon tabakasının mekanik ve bağlantı özelliklerini etkilediği bilinmektedir. Bu çalışma için %4.8 ve %6 Ag içeriğine sahip No#2 teli bu bilgiler ışığında önerilmektedir.

3) Mikrosertlik incelemelerinde, %40 Ag içeren telin sertliği diğer dolgu metallerine göre yüksektir. Bu durum Zn ve Ag alaşımlarının difüzyonları ile açıklanabilmektedir. Ag'nin artmasının sonucu Zn içeren dolgu metalleri mikroyapısal olarak oldukça incelenmiş, bunun sonucunda mikrosertlik değerinde artış olmuştur.

4) Patlatma testi ile bazı bağlantıların basınç değerleri tespit edilmiş ve eşitlikten faydalanarak nicel olarak değerlendirmelere ulaşılmıştır. Ag içeriği %4.8 olan No#2 dolgu metali ile yapılan bağlantıda hasar bakır boruda meydana gelmiş, bu sonuç bağlantı bölgesinin yüksek performansını göstermiştir. Bu ikiliye ait zor çalışma koşullarında benzetim yapılan ortam için bu telin uygun olduğuna performans/maliyet bakış açısıyla karar verilmiştir.

### Teşekkür

Yazarlar maddi destek sağlayan MCBÜ Bilimsel Araştırma Projeleri birimine (Proje Kodu:2018077) teşekkür eder. Ayrıca lehim işlemleri için Johnson Controls' e teşekkür ederler.

### Kaynakça

[1] B. Stalin, M. Ravichandran, K. Vadivel, J. Vairamuthu, Optimization of brazing process parameters in butt joint of brass 319 using

Taguchi method, Mater. Today Proc. 21 (2020) 237-243. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.04.226>.

- [2] Kaya Y, Lehimleme Tekniğinde Otomasyon ve İşlem Parametrelerinin Etkilerinin İncelenmesi, Yıldız Teknik Üniversitesi, 2008.
- [3] J.A. Ares, Metal: Forming, Forging, and Soldering Techniques, Barron's E, 2006.
- [4] R.W. Messler, Joining of materials and structures: from pragmatic process to enabling technology, Elsevier, 2004.
- [5] A.E. Miller, V. R., Schwaneke, Interfacial Compositions of Silver Filler Metals on Copper, Brass, and Steel, Weld. J. 57 (1978).
- [6] J.Z. Zhou, S. Huang, J. Sheng, J.Z. Lu, C.D. Wang, K.M. Chen, H.Y. Ruan, H.S. Chen, Effect of repeated impacts on mechanical properties and fatigue fracture morphologies of 6061-T6 aluminum subject to laser peening, Mater. Sci. Eng. A. 539 (2012) 360-368. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2012.01.125>.
- [7] H. Wang, S. Xue, Effect of Ag on the properties of solders and brazing filler metals, J. Mater. Sci. Mater. Electron. 27 (2016) 1-13. <https://doi.org/10.1007/s10854-015-3747-z>.
- [8] D.K. Basri, L. Sisamouth, Y. Farazila, Y. Miyazawa, T. Ariga, Brazeability and mechanical properties of Ag-Cu-Sn brazing filler metals on copper-brazed joint, Mater. Res. Innov. 18 (2014) S6-429-S6-432. <https://doi.org/10.1179/1432891714Z.00000000992>.
- [9] D.M. Jacobson, Principles of brazing, ASM International, United States of America, 2005.
- [10] C. Ma, S. Xue, B. Wang, Study on novel Ag-Cu-Zn-Sn brazing filler metal bearing Ga, J. Alloys Compd. 688 (2016) 854-862. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2016.07.255>.
- [11] T. Watanabe, A. Yanagisawa, T. Sasaki, Development of Ag based brazing filler metal with low melting point, Sci. Technol. Weld. Join. 16 (2011) 502-508. <https://doi.org/10.1179/1362171811Y.0000000037>.
- [12] W.M. Long, G.X. Zhang, Q.K. Zhang, In situ synthesis of high strength Ag brazing filler metals during induction brazing process, Scr. Mater. 110 (2016) 41-43. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2015.07.041>.



- [13] F. Sui, W. Long, S. Liu, G. Zhang, L. Bao, H. Li, Y. Chen, Effect of calcium on the microstructure and mechanical properties of brazed joint using Ag-Cu-Zn brazing filler metal, *Mater. Des.* 46 (2013) 605–608. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.11.021>.
- [14] T. Zaharinie, Z. Huda, M.F. Izuan, M. Hamdi, Development of optimum process parameters and a study of the effects of surface roughness on brazing of copper, *Appl. Surf. Sci.* 331 (2015) 127–131. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2015.01.078>.
- [15] Y. Shabtay, M. Ainali, A. Lea, New brazing processes using anneal-resistant copper and brass alloys, *Mater. Des.* 25 (2004) 83–89. [https://doi.org/10.1016/S0261-3069\(03\)00162-6](https://doi.org/10.1016/S0261-3069(03)00162-6).
- [16] J.A.R. Vianco, P. T., Properties of ternary Sn-Ag-Bi solder alloys: Part I—Thermal properties and microstructural analysis, *J. Electron. Mater.* 28 (1999) 1127–1137.
- [17] Reid, M., Effect of Ag content on the microstructure of Sn-Ag-Cu based solder alloys, *Solder. Surf. Mt. Technol.* (2008).
- [18] He, Peng, Effect of alloy element on microstructure and impact toughness of Sn-57 Bi lead-free solders, *J. Mater. Eng.* 10 (2010) 13–17.
- [19] S.P.G. Chakravarty, I., “Formation of intermetallics during brazing of alumina with Fe, Ni and Cr using Ag-30 Cu-10 Sn as filler metal,” *Mater. Charact.* 51.4 (2003) 235–241.
- [20] Çınar S., Bakır Ve Alaşımlarının Sert Lehiminde Farklı Kimyasal Kompozisyonlara Sahip İlave Tellerin Bağlantının Mekanik Ve Mikroyapı Özelliklerine Etkisi, Gazi Üniversitesi, 2010.
- [21] A.A. 8M/A5. 8:201.-A. 1, A.A.N. Standard, Specification for Filler Metals for Brazing and Braze Welding, in: *Specif. Fill. Met. Brazing Braze Weld.*, 10th Editi, 8669 Doral Blvd., Suite 130, Doral, FL 33126, 2011.
- [22] Lenntech, Chemical elements listed by electronegativity, (n.d.) <https://www.lenntech.com/periodic-chart-elements/e>.
- [23] J. Cao, L.X. Zhang, H.Q. Wang, L.Z. Wu, J.C. Feng, Effect of Silver Content on Microstructure and Properties of Brass/steel Induction Brazing Joint Using Ag-Cu-Zn-Sn Filler Metal, *J. Mater. Sci. Technol.* 27 (2011) 377–381. [https://doi.org/10.1016/S1005-0302\(11\)60077-7](https://doi.org/10.1016/S1005-0302(11)60077-7).
- [24] W. Hanson, K. Ironside, J. Fernie, Active metal brazing of zirconia, *Acta Mater.* 48 (2000) 4673–4676. [https://doi.org/10.1016/S1359-6454\(00\)00256-1](https://doi.org/10.1016/S1359-6454(00)00256-1).
- [25] G. Zeng, S. Xue, L. Zhang, L. Gao, W. Dai, J. Luo, A review on the interfacial intermetallic compounds between Sn-Ag-Cu based solders and substrates, *J. Mater. Sci. Mater. Electron.* 21 (2010) 421–440. <https://doi.org/10.1007/s10854-010-0086-y>.
- [26] M.G. Cho, Y.S. Park, S.-K. Seo, K.-W. Paik, H.M. Lee, Effect of Ag Addition on the Ripening Growth of  $\text{Cu}_{6}\text{Sn}_{5}$  Grains at the Interface of Sn-xAg-0.5Cu/Cu During a Reflow, *IEEE Trans. Components, Packag. Manuf. Technol.* 1 (2011) 1939–1946. <https://doi.org/10.1109/TCPMT.2011.2160181>.
- [27] Y.H. Zhu, S. To, W.B. Lee, X.M. Liu, Y.B. Jiang, G.Y. Tang, Effects of dynamic electropulsing on microstructure and elongation of a Zn-Al alloy, *Mater. Sci. Eng. A.* 501 (2009) 125–132. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2008.09.080>.
- [28] L. Wierzbicki, W. Malec, J. Stobrawa, B. Cwolek, B. Juszczuk, Studies Into New, Environmentally Friendly Ag-Cu-Zn-Sn Brazing Alloys of Low Silver Content, *Arch. Metall. Mater.* 56 (2011). <https://doi.org/10.2478/v10172-011-0017-9>.
- [29] G. Vamadevan, F.F. Kraft, Processing effects in aluminum micro-channel tube for brazed R744 heat exchangers, *J. Mater. Process. Technol.* 191 (2007) 30–33. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.03.040>.
- [30] M.G. Li, D.Q. Sun, X.M. Qiu, S.Q. Yin, Effect of tin on melting temperature and microstructure of Ag-Cu-Zn-Sn filler metals, *Mater. Sci. Technol.* 21 (2005) 1318–1322. <https://doi.org/10.1179/174328405X66932>.
- [31] X.X. Wang, Effect of electroplated tin coating on properties of BA50CuZn brazing filler metal, *Trans. China Weld. Inst.* 35 (2014) 61–64.
- [32] X. Wang, J. Peng, D. Cui, Microstructure and Mechanical Properties of Stainless Steel/Brass Joints Brazed by Sn-Electroplated Ag Brazing Filler Metals, *J. Mater. Eng. Perform.* 27 (2018) 2233–2238. <https://doi.org/10.1007/s11665-018-3321-1>.

y.

- [33] O. Bodur, Lehim alaşımlarının sınıflandırılması, kısa gösterilişleri ve Türkiye'deki durum, 1994.
- [34] B. Ođuz, Sert lehimleme teori uygulama, İstanbul, 1988.
- [35] A.R. Lashin, M. Mossa, A. El-Bediwi, M. Kamal, Study of some physical properties of the rapidly solidified Sn-Sb-Cu-Zn alloys, Mater. Des. 43 (2013) 322-326. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.06.014>.