



Soda Kireç Silikat Cam Tüp – Bakır Bilezik Birleştirmelerinin O₂/Propan Alev İşlemeyle Hava Ortamında Gerçekleştirilmesi

Joining of Soda Lime Silicate Glass Tube to Copper Inset by O₂/Propane Flame Work in Air Ambient

Mustafa Burak Telli 

Kocaeli Üniversitesi, Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Kocaeli, Türkiye

Öz

Parabolik güneş enerji sistemlerinin ısı veriminin artırılmasında cam – metal birleştirmeler önemlidir. Bu çalışmada soda kireç silikat cam tüp – bakır bilezik birleştirilmeleri O₂/propan alev işlemeyle hava ortamında gerçekleştirilmiştir. Birleştirilen cam tüpte her han gibi bir makro çatlak gözlenmemiştir. Işık mikroskop incelemelerinde bakırın hava ortamında alevle işleme sırasında oksitlendiği sonrasında soda kireç silikat cam tüp – bakır birleşme yüzeyinde oksitlenmiş bakırla cam arasında gerçekleşen kimyasal reaksiyon sonucunda gaz kabarcık oluşumlarına neden olduğu gözlemlenmiştir. Işık ve taramalı elektron mikroskop incelemeleri kullanılan numune boyutlarında soda kireç silikat cam tüp – bakır birleşmesinin camda her han gibi bir mikro çatlak oluşturmadan gerçekleştirildiğini göstermiştir. Cam tüp - bakır bilezik alev işlemeyle birleştirilmesi sonrası oda sıcaklığına soğuma sırasında oluşan kalıntı gerilmeler ve gerinmeler ANSYS 14 çoklu fizik yazılımı kullanılarak sonlu elamanlar metoduyla modellenmiştir. Modelleme sonuçları camın çok yüksek kalıntı gerilme ve gerinmelerine maruz kalmadığını ve deneysel makro ve mikro çatlak oluşmaması gözlemlenmelerle örtüştüğü göstermiştir. Model analizlerine göre kullanılan numune boyutlarında birleştirilen soda kireç silikat cam tüp üzerinde en yüksek 50 MPa seviyelerinde maksimum ve en düşük -90 MPa seviyelerinde minimum asal gerilmeler oluşmuştur. Bakır bilezikteyse en yüksek 50 MPa seviyelerinde maksimum ve en düşük -10 MPa seviyelerinde minimum asal gerilmeler oluşmuştur. Kalıntı gerilmelerin etkisi nedeniyle akma dayanımı düşük olan bakır bileziğin birleştirme bölgesine yakın kısmında 0.008 seviyelerinde eşdeğer plastik deformasyon oluşmuştur.

Anahtar Kelimeler: Alev işlemeyle birleştirme, ANSYS 14 çoklu fizik modelleme, Bakır, Kalıntı gerilme ve gerinme, Soda kireç silikat cam, Sonlu elamanlar yöntemi

Abstract

For achieving higher energy efficiencies of linear parabolic sun collector systems, glass – metal joining is important. In this study, soda lime silicate glass tube – copper inset joining was achieved by employing O₂/propane flame working in air. No macro crack formation was observed for joined glass tube. Light microscope investigations of joined sample showed that copper was oxidized during flame work in air ambient. Then oxidized copper reacted with glass at joining interface leading some bubble formation in joined glass. Light and scanning electron microscope investigations showed that glass tubes – copper inset joining could be done without micro crack formation in glass region for the used sample dimensions. Residual stress and strain levels of joined pieces due to cool down from high temperature joining to room temperature were modeled by using ANSYS14 multi physics software employing finite element method. Modeling results suggested that the joined glass experienced not very high residual stress and strain levels and agreed well with experimental findings of not observing any macro or micro cracks at joined glass. For studied sample profile, maximum and minimum principal stress levels were 50 MPa and - 90 MPa for glass side and were 50 MPa and -10 MPa for copper side. Copper inset having low yield stress was also plastically deformed at equivalent plastic strain level of 0.008 close to the joining interface due to residual joining stress.

Keywords: Soda lime silicate glass, ANSYS 14 multi physics modeling, Copper, Flame work joining, Residual stress and strains, Finite element method

*Sorumlu yazarın e-posta adresi: mustafa.telli@kocaeli.edu.tr

1. Giriş

Parabolik güneş enerji sistemlerin ısı veriminin artırılması için ısı toplayıcı ünitelerinde cam – metal birleştirmelere ihtiyaç duyulmaktadır (Lei vd. 2012). Borosilikat cam – kovar alaşım birbirine yakın termal genleşme göstermeleri nedeniyle bu uygulama için genellikle tercih edilen cam – metal birleştirmelerdir (Lei vd. 2010, Chanmuang vd. 2008). Soda kireç silikat cam dış ortam uygulamalarında yaygın kullanılan ekonomik bir camdır (Laurent vd. 2014). Bakır ise korozyon dayanımı nedeniyle boru tesisat işlemlerinde tercih edilen bir malzemedir (Davis 2001). Soda kireç silikat cam tüp – bakır birleştirmeleri gerçekleştirilmesi durumunda borosilikat cam – kovar alaşım birleştirmelere ekonomik bir alternatif olabilir. Alev işleme camın şekillendirilmesinde ve birleştirmesinde kullanılan camın bölgesel ısıtılmasına imkân veren bir tekniktir. Literatürde soda kireç silikat camın tüp – bakır birleştirmelerinin O₂/propan alev işlemeyle hava ortamında gerçekleştirilmesine yönelik henüz bir çalışmada yer almamaktadır. Bu çalışmada O₂/propan alev işlemeyle soda kireç silikat tüp – bakır bilezik birleştirmesi hava ortamında başarıyla gerçekleştirilmiştir. Birleştirilen soda kireç silikat cam tüp – bakır birleştirme yüzeyi ışık ve taramalı elektron mikroskoplarıyla incelemiş ve cam - bakır birleştirme yüzeyinde gerçekleşen reaksiyonların birleştirmeye olan etkileri verilmiştir. Alevle işlemeyle birleştirme sonrası oda sıcaklığına soğumayla oluşan kalıntı gerilme ve gerinimler sonlu elamanlar yöntemi kullanan ANSYS 14 çoklu fizik yazılımıyla modellenmiştir. Birleştirilen bölgede oluşan kalıntı gerilme ve gerinim değerlerinin birleştirmenin başarısındaki önemi tartışılmıştır.

2. Gereç ve Yöntem

O₂/propan alev işlemeyle birleştirme deneyinde soda kireç silikat cam tüp (Schott Ar Glass) ve % 99.9 saflıkta bakır çubuktan hazırlanmış bakır bilezik kullanılmıştır. Soda kireç silikat cam tüp, tüp şekli verilirken kalmış olabilecek ön gerilmelerin giderilmesi için 550 °C ye ısıtılıp 20 dakika tutulup sonrasında 6 saat içinde oda sıcaklığına soğutularak gerilim giderme işlemi gerçekleştirilmiştir. Birleştirmede kullanılacak bakır bilezik bakır ise bakır çubuğun istenilen boyutlara elmas disk kullanılarak kesilmesi, tornayla işlenmesi ve camla birleştirilecek bölgesinin 1000 nolu SiC zımpara kâğıdı kullanılarak zımparalanmasıyla hazırlanmıştır. Bakır bileziğin soda kireç silikat cam tüp içine yerleştirilmesi sonrasında, O₂/propan alevi cam tüpün bakır bilezikle temas eden dış kısmına gelecek şekilde ve numune sürekli

döndürülürken 2 dakika süre boyunca uygulanmıştır. Alevle işlemeyle birleştirilen numune soğumasına izin verilmeden 550 °C de bekletilen fırına yerleştirilmiş 20 dakika boyunca cam gerilim giderme işlemine sonrası 6 saat içinde oda sıcaklığına soğutulmuştur.

Soda kireç silikat cam tüp – bakır bilezik numunesinin birleştirme bölgesi Zeiss Axiotech model ışık mikroskopuyla karanlık alan görüntülemesinde incelenmiştir. Taramalı elektron mikroskop (TEM) incelemelerinde JEOL 6060 model cihazıyla 20 kV hızlandırma gerilimi kullanılarak ikincil elektron emisyon ve geri saçılmış elektron görüntülemeleri gerçekleştirilmiştir. TEM incelemeleri için cam – bakır birleştirme bölgesi cam tüpün dış kısmından başlayarak cam - bakır birleştirme kısmı açığa çıkana dek 1000 no lu SiC zımpara kâğıdıyla zımparalanarak hazırlanmıştır. TEM incelemesi sırasında cam bölgesinde oluşabilecek elektron şarj etkilerini azaltmak için zımparalanan numune inceleme öncesinde sıçratma tekniği kullanılarak ince Au katmanıyla kaplanmıştır.

Soda kireç silikat cam tüp – bakır bilezik birleştirilme numunesinde oluşan kalıntı gerilmeler ve gerinimler sonlu elamanlar metodunu esas alan ANSYS14 çoklu fizik yazılımı (ANSYS Yazılım Şirketi 2012) kullanılarak modellenmiştir. Birleştirilen soda kireç silikat cam tüp – bakır bilezik numunede oluşan kalıntı gerilme ve gerinimlerin 550 °C de gerçekleştirilen cam gerilim giderme işlemi sonrasında oda sıcaklığına soğuması sırasında gerçekleştiği kabul edilerek yapılmıştır. Soda kireç silikat cam elastik gerilme ve gerinim gösteren malzeme olarak modellenirken bakır ise elastik ve plastik gerinimler gösteren malzeme olarak gözetilmiştir. Kullanılan malzeme özellikleri çizelge 1 de verilmiştir. Modellemede bakırın akma dayanımının plastik deformasyonla artışı gerçek gerinim - gerçek gerilme seviyelerine doğru doğrusal olarak arttığı kabul edilmiştir. Modellemede kullanılan şekil ve boyutlar: soda kireç silikat cam için 100 mm boy, 13.5 mm dış çap ve 1 mm duvar kalınlığıdır. Bakır bilezik için ise camla birleştirilmeyen üst kısımda 1.5 mm boy, 12 mm dış çap ve 1 mm duvar kalınlığı ve camla birleştirilen alt kısımdaysa 1 mm boy 11.5 mm dış çap ve 0.75 mm et kalınlığıdır.

3. Bulgular

Şekil 1'de O₂/propan alev işlemeyle hava ortamında birleştirilen soda kireç silikat cam tüp – bakır bilezik numunesi ve birleştirme bölgesinin daha yakından alınmış görüntüsü yer almaktadır. Şekil 1'de gösterildiği üzere birleştirilen cam tüpte ve bakır bilezikle birleştirme

Çizelge 1. Kalıntı gerilme ve gerinim modellenmesinde kullanılan malzeme özellikleri.

Malzeme Özellikleri	Soda Kireç Silikat Cam	Cu
Termal Genleşme Katsayısı (α)	9.1×10^{-6}	20.2×10^{-6}
Elastik Modül (E) (Pa)	73×10^9	110×10^9
Poisson Oranı (ν)	0.22	0.364
Akma Dayanımı (σ_y) (Pa)		33×10^6
Gerçek Gerinim ($\epsilon_{\text{Gerçek}}$) Seviyesinde (m/m)		0.3
Gerçek Gerilme ($\sigma_{\text{Gerçek}}$) Seviyesi (Pa)		250×10^6

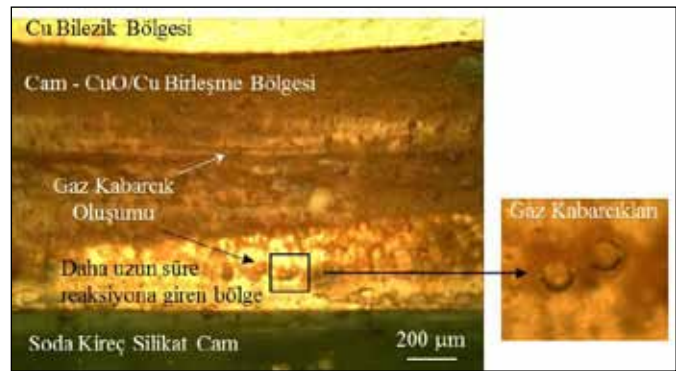
bölgesinde her han gibi bir çatlak oluşmamıştır. Bu gözlem birleştirilen cam tüpte oluşan kalıntı gerilmelerin düşük kaldığını ve camda çatlak oluşturmaya veya camı kırmaya yetmediğini göstermektedir. Şekil 1'de hava ortamında alevle işleme sırasında bakırın hızla oksitlendiği de (siyah bakır oksit oluşumuyla) görülmektedir. Şekil 1'de birleştirme bölgesinin yakın görüntüsünde beyaz kutuyla belirtilen kısım ışık mikroskobuyla incelenmiştir.

Şekil 2'de soda kireç silikat cam tüp – bakır bilezik birleştirme bölgesinin 5x büyütmede karanlık alan görüntülemesiyle alınmış ışık mikroskop görüntüsü verilmiştir. Cam tüpün - bakır bilezikle birleştirildiği kısımda her han gibi bir mikro çatlak oluşumu gözlemlenmemiştir. Bu durum oluşan kalıntı gerilmelerin camda mikro çatlak oluşumuna sebep olabilecek kadar yükselmediğinin işaret etmektedir. Şekil 2'de alevle işleme sırasında bakırın hızla oksitlenerek bakır yüzeyinde bakır oksit oluşturduğu (siyah bölge) ve oksitlenen bakırın soda kireç silikat camla reaksiyona girip birleştirme yüzeyinde gaz kabarcıklarına neden olduğunu da gözlemlenmiştir. Oluşan bakır oksit katmanı alt birleştirme bölgesinde alevle işleme sırasında camla daha uzun süre temas etmiş ve daha fazla reaksiyona girmiştir. Bu bölgede bakır oksit katmanının daha ince olduğu ve gaz kabarcık miktarının arttığı gözlemlenmektedir. Bakır oksidin camla birleştirme sırasında reaksiyona girmesi sırasında incelerek azalması ve gaz kabarcık oluşumunun artması, birleştirme sırasında bakır oksitten bakırın ayrılıp cam içinde çözünmesi ve reaksiyona giremeyen oksijeninse yüzeyde gaz kabarcığı oluşturmasıyla açıklanabilir.

Şekil 3'de soda kireç silikat cam tüp – bakır bilezik birleştirmesinin 10x büyütmede ikincil elektron ve cam/CuO/Cu birleştirme bölgesinin 25x büyütmede geri saçılmış elektron TEM görüntüleri yer almaktadır. TEM görüntüleri hava ortamında alevle işleme sırasında bakır yüzeyinde CuO oluştuğunu ve oluşan oksidin birleştirme bölgesinde camla



Şekil 1. O₂/propan alev işlemeyle hava ortamında birleştirilen soda kireç silikat cam tüp – bakır bilezik numunesi ve birleştirme bölgesinin daha yakından alınmış görüntüsü.



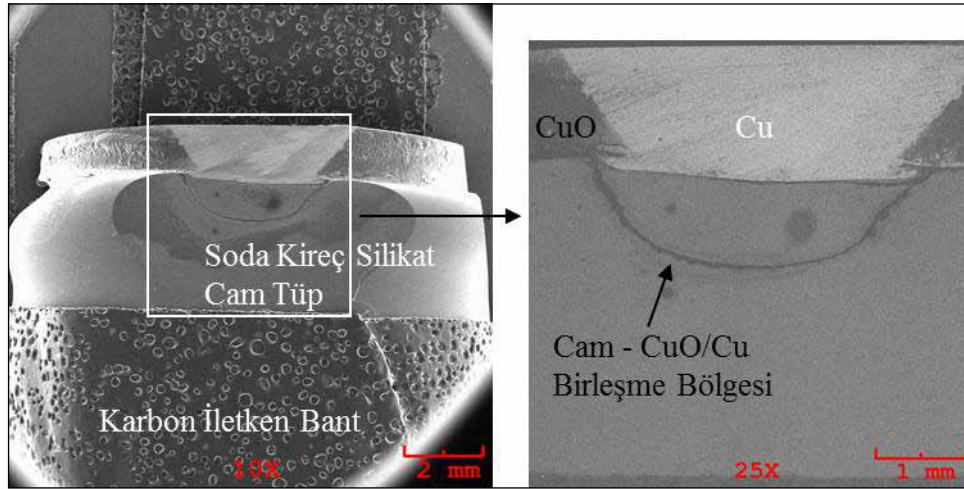
Şekil 2. Soda kireç silikat cam tüp – bakır bilezik birleştirme bölgesinin 5x büyütmede karanlık alan görüntülemesiyle alınmış ışık mikroskop görüntüsü.

reaksiyona girdiği göstermektedir. Üsten zımparalanarak hazırlanan cam tüple - bakır bilezikle birleştirme bölgesinde her han gibi bir makro veya mikro çatlak oluşmadığını da gözlenmektedir. Bu birleştirme nedeniyle oluşan kalıntı gerilmelerin numunenin hazırlaması sırasında oluşabilecek yüzey hasarlarına dayanabilecek kadar düşük kaldığını da göstermektedir.

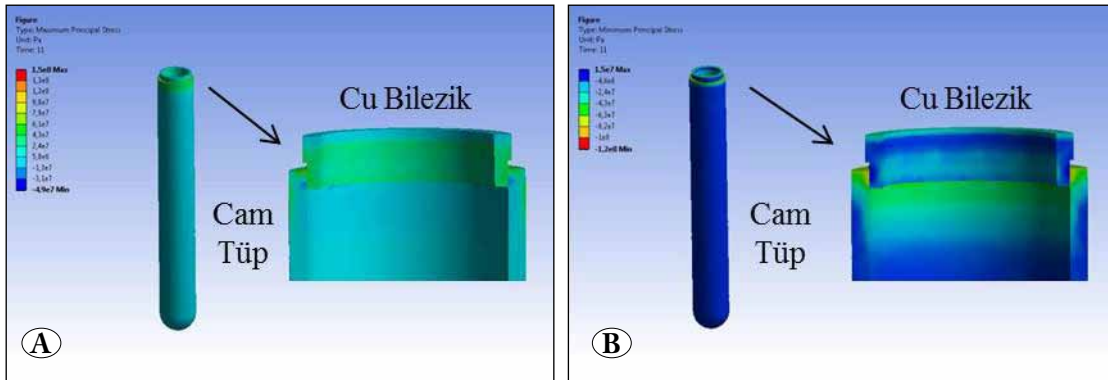
Şekil 4'de soda kireç silikat cam tüp – bakır bilezik numunesinde birleştirme sonrası soğumayla oluşan maksimum ve minimum asal kalıntı gerilmeler Ansys 14 çoklu fizik yazılımıyla modellenip verilmiştir. Şekil 4'de kalıntı gerilmelerin cam – metal birleşme bölgesinde yükseldiğini göstermektedir. Camın birleştirme bölgesine yakın köşe kısmında nispeten düşük 50 MPa seviyelerinde maksimum asal kalıntı gerilmelere ve çok yüksek olmayan -90 MPa seviyelerinde minimum asal kalıntı gerilmelerine maruz kalmaktadır. Bakır bilezikte ise birleştirme bölgesinde 50 MPa seviyelerinde maksimum asal gerilmelere ve -10

MPa seviyelerinde minimum asal kalıntı gerilmelere maruz kalmaktadır. Modelleme sonunda kullanılan numune boyutlarında birleştirme bölgesinde camın daha ziyade çok yüksek olmayan basma gerilmelerine ve nispeten düşük çekme kalıntı gerilmelerine maruz kalmadığı gözlemlenmektedir ve bu sonuç deneysel camda makro ya da mikro çatlak oluşmaması gözlemiyle de örtüşmektedir.

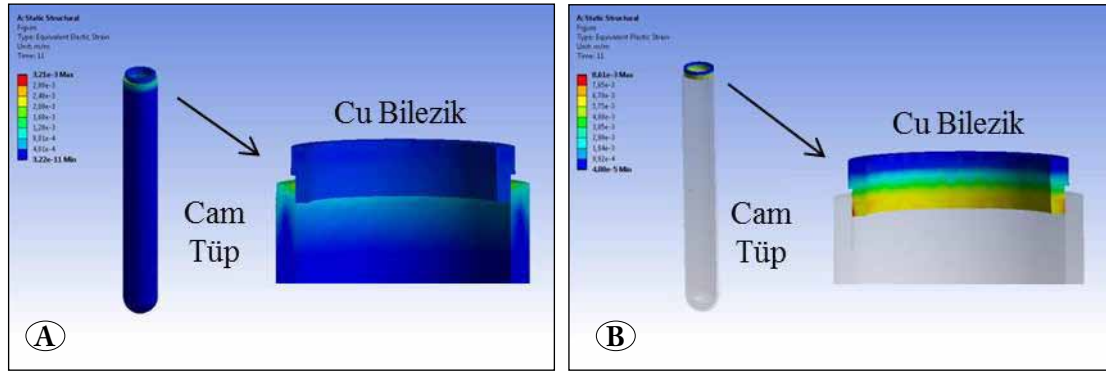
Şekil 5'de soda kireç silikat cam tüp – bakır bilezik numunesinde birleştirme sonrası soğumayla oluşan eşdeğer elastik ve plastik kalıntı gerilmeler Ansys 14 çoklu fizik yazılımıyla modellenip verilmiştir. Şekil 5. a)'da camda oluşan eşdeğer elastik gerinimlerin nispeten düşük kaldığı ve cam tüp – bakır bilezik birleştirme bölgesine yaklaştıkça yükselerek köşe kısmında 0.003 mm/mm seviyelerine ulaştığını göstermektedir. Şekil 5. b)'de eşdeğer plastik gerilmelerin bakır bilezik kısmında birleştirme bölgesinde yakın kısımlara doğru yükseldiği ve birleştirme yüzeyinde 0.008 mm/mm seviyelerine ulaştığını belirtmektedir.



Şekil 3. Soda kireç silikat cam tüp – bakır bilezik birleştirmesinin 10x büyütmede ikincil elektron ve cam/CuO/Cu birleştirme bölgesinin 25x büyütmede geri saçılmış elektron TEM görüntüleri.



Şekil 4. ANSYS14 çoklu fizik yazılımıyla modellenmiş soda kireç silikat cam tüp – bakır bilezik birleştirmesinde oluşan kalıntı gerilmeler: **A)** numunenin genelinde ve birleştirme bölgesinin kesitinde oluşan maksimum asal gerilmeler, **B)** numunenin genelinde ve birleştirme bölgesinin kesitinde oluşan minimum asal gerilmeler.



Şekil 5. ANSYS14 çoklu fizik yazılımıyla modellenmiş soda kireç silikat cam tüp – bakır bilezik birleştirmesinde oluşan kalıntı gerilmeler: **A)** numunenin genelinde ve birleştirme bölgesinin kesitinde oluşan eşdeğer elastik gerilmeler, **B)** numunenin genelinde ve birleştirme bölgesinin kesitinde oluşan eşdeğer plastik gerilmeler.

Bakır bileziğin plastik olarak deforme olması birleştirme sonrasında soğuma sırasında oluşan gerilmelerin nispeten düşük kalmakla beraber bakırın akma dayanımını (33 MPa) değerini aşacak seviyelere yükseldiğini göstermektedir.

4. Sonuçlar ve Değerlendirme

Bu çalışmada soda kireç silikat cam tüp – bakır bilezik birleştirmesi O₂/propan alev işlemeyle hava ortamında gerçekleştirilmiştir. Birleştirme neticesinde kullanılan numune boyutlarında camda her han gibi bir makro veya mikro çatlak oluşumu gözlemlenmemiştir. Işık mikroskop incelemeleri bakırın hava ortamında oksitlendiğini ve soda kireç silikat camın hava ortamında oksitlenmiş bakırla reaksiyona girmesi sonucu birleştirme yüzeyinde gaz kabarcık oluşumu gözlemlenmiştir. Işık ve elektron mikroskop incelemelerinde birleştirme işlemi sonucunda cam birleştirme yüzeyinde her han gibi bir mikro çatlak oluşumu da gözlemlenmemiştir. Bu kullanılan numune boyutları için camda oluşan kalıntı gerilmelerin nispeten düşük kaldığını göstermiştir. ANSYS14 çoklu fizik modelleme neticelerine göre cam tüp birleştirme yüzeyinin köşe kısmında nispeten düşük 50 MPa seviyelerinde maksimum asal gerilmelere ve çok yüksek olmayan -90 MPa seviyelerinde minimum asal gerilmelere maruz kalmıştır. Cam tüpün birleştirme yüzeyinde köşe kısmında nispeten düşük 0.003 mm/mm seviyelerinde eşdeğer elastik gerilmeler oluşmaktadır. Bakır bileziğin birleştirme bölgesinde ise nispeten düşük 50 MPa seviyelerinde maksimum asal gerilmeler ve -10 MPa seviyelerinde minimum asal kalıntı gerilmeler oluşmaktadır. Bakırın akma dayanımının düşük oluşu (33 MPa) nedeniyle bakırın birleştirme yüzeyinde 0.008 mm/mm seviyelerine ulaşan eşdeğer plastik gerilmeler oluşmuştur.

5. Teşekkür

Bu araştırma Kocaeli Üniversitesi 2011/070 Nolu Bilimsel Araştırma Projesi kapsamında gerçekleştirilmiştir.

6. Kaynaklar

- Bai, T., Guan, KS. 2013.** Evaluation of stress corrosion cracking susceptibility of nanocrystallized stainless steel 304L welded joint by small punch test. *Mater Design.*, 52:849-860.
- Chanmuang, C., Naksata, M., Chairuangstri, T., Jain, H., Lyman, CE. 2008.** Microscopy and strength of borosilicate glass-to-Kovar alloy joints. *Mat Sci Eng A-Struct.*, 474:218-224.
- Davis, JR. 2001.** ASM Specialty Handbook: Copper and Copper Alloys, ASM International, Inc. Geauga County, Ohio, USA, 154 pp.
- Lei, DQ., Wang, ZF., Li, J. 2010.** The analysis of residual stress in glass-to-metal seals for solar receiver tube. *Mater Design.*, 31:1813-1820.
- Lei, DQ., Wang, ZF., Li, J., Li, JB., Wang, ZJ. 2012.** Experimental study of glass to metal seals for parabolic trough receivers. *Renew Energ.*, 48:85-91.
- Laurent, O., Mantsi, B., Micoulaut, M. 2014.** Structure and Topology of Soda-Lime Silicate Glasses: Implications for Window Glass. *J Phys Chem B.*, 118:12750-12762.
- Wallinder, IO., Bertling, S., Kleja, DB., Leygraf, C. 2005.** Corrosion-induced release and environmental interaction of chromium, nickel and iron from stainless steel. *Water Air Soil Pol.*, 170:17-35.