

Difüzyon Kaynağı ile Birleştirilmiş Bakır ve Porselenin Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Termal ve Yapısal Analizleri

Fatmagül TOLUN^{1,*}, Sare ÇELİK²

¹Balıkesir Üniversitesi Balıkesir MYO, Motorlu Araçlar ve Ulaş. Tekn. Böl., Çağış Kampüsü, Balıkesir.

²Balıkesir Üniversitesi Müh.-Mim. Fak. Makina Müh. Böl., Çağış Kampüsü, Balıkesir.

Özet

Bu çalışmada, difüzyon kaynağı ile birleştirilmiş bakır ve porselen malzemelerin sonlu elemanlar yöntemine göre termal ve yapısal analizleri araştırılmıştır. Bakır ve porselen malzemeler; elektrik elektronik, elektromekanik ve uzay sanayinde, birlikte kullanılmaktadır. Özel kaynak yöntemlerinden biri olan difüzyon kaynağı; kusursuz bir ara yüzey ve yüksek sıcaklıkta mekanik direnç sağladığı için bakır ve porselen malzemelerin birleştirilmesinde tercih edilmiştir. Deneyler sonrasında, kaynaklı numunelere kesme testi uygulanarak kaynaklı bölgenin mukavemeti araştırılmış ve sertlik değişimleri incelenmiştir. Kesme testi sonuçlarına göre, en iyi kaynak dayanımına sahip numunelerin parametreleri esas alınarak, sonlu elemanlar yöntemine göre, bilgisayar destekli analiz programında, termal analiz ve yapısal analiz yapılmıştır. Analiz sonuçları ve deney sonuçları karşılaştırılarak, her iki malzemede homojen ısı dağılımı sağlanana kadar deney esnasında ısıtma ve soğutma süreleri arttırılmıştır. Böylece malzemelerin farklı termal özelliklerinden kaynaklanan heterojen ısı dağılımı giderilmiştir.

Anahtar kelimeler: Difüzyon kaynağı, porselen, bakır, sonlu elemanlar analizi

Thermal and Structural Analysis with Finite Element Method of Copper and Porcelain, Bonded by Diffusion Welding

Abstract

In this study, thermal and structural analysis of copper and porcelain materials welded by diffusion bonding were investigated. Copper and porcelain materials are used together in electric-electronic and aerospace industry. Diffusion bonding which is one

* Fatmagül TOLUN, ftolun @balikesir.edu.tr, Tel: (266) 612 12 09.

of the special welding methods is preferred to join of copper and porcelain because of their mechanical resistance at high temperature and to provide a perfect interface. After the experiments, shear test was used to welded specimens and strength of welded area and hardness changes were examined. According to shear test results, thermal and structural analysis were applied in computer aided analysis program with finite element method based on parameters of specimens which have best welding strength. By comparing the analysis and experiment results, until homogeneous heat distribution is provided with both materials, during the experiment heating and cooling times were increased. So, heterogeneous heat distribution was resolved which is based on different thermal properties of materials.

Keywords: *Diffusion welding, porcelain, copper, finite elements analysis*

1. Giriş

Teknolojinin gelişmesiyle, yeni malzemeler ve bu malzemelerin birlikte kullanım alanları ortaya çıkmaktadır. Bilinen en eski malzemelerden biri olan porselenlerin, günümüzde endüstrinin farklı alanlarında kullanıldığı görülmektedir. Elektromekanik, inşaat, otomotiv, elektrik elektronik, uzay sanayileri; porselen malzemelerin yüksek elektrik yalıtım özelliği, ısıya ve darbelere dayanım gibi özellikleri nedeniyle tercih edildiği alanlardan bazılarıdır. Cu ise; üstün fiziksel ve kimyasal özellikleriyle; elektrik, elektronik, inşaat, ulaşım sanayilerinde ve diğer pek çok alanda yaygın olarak kullanılan bir metaldir. Cu'ın yüksek elektrik iletkenliği, porselenin elektrik yalıtkanlığı özellikleri nedeniyle elektrik elektronik, elektromekanik ve uzay sanayilerinde bu iki malzeme bir arada kullanılmaktadır [1].

Difüzyon kaynağı, birbirleriyle birleştirilmeleri ergitme kaynağı ile mümkün olmayan, aralarında seramik ve kompozitlerin de yer aldığı, birçok demir esaslı ve demir dışı metal ve alaşımlarının birleştirilmesini mümkün kılan bir katı hal kaynağıdır. Difüzyon kaynağıyla kusursuz bir ara yüzey ve yüksek sıcaklıkta mekanik direnç elde edilebilmektedir. Bu avantajları nedeniyle porselen ve bakırın birleştirilmesinde; difüzyon kaynağı tekniği tercih edilmiştir.

S. B. Sinnotta ve E. C. Dickey; seramik metal ara yüzeylerinin atomik yapı özelliklerini incelemişlerdir. Çalışmada; seramik metal ara yüzey yapılarındaki son ilerlemeler ve gelişmelerle ilgili teorik ve deneysel çalışmalar kritik edilmiştir [2]. S. Benli yüksek lisans tezinde, kaynaklı parçalarda oluşan artık gerilmeleri incelemiştir. Çalışmada kaynaklı parçalarda oluşan artık gerilmeler, sonlu elemanlar yöntemi ile ANSYS programında modellenip analiz edilmiştir [3]. F. Tolun yüksek lisans tezinde; yük taşıtlarının taşıyıcı aksamalarının gerçek yol yükleri altında analiz edilmesini araştırmıştır. Çalışmada ağır iş makinalarının ve özel yüklerin taşınmasında kullanılan yarı römork şasisi sonlu elemanlar yöntemine göre (FEM) ANSYS programında modellenip, üzerine dış yükler etki ettirilmiştir. Bu analizin sonucunda, kaynaklı bölgede oluşan kritik gerilme ve birim şekil değiştirme değerleri tespit edilmiştir. ANSYS programında kritik gerilme altındaki kaynaklı şasi bağlantısını modellenip, öncelikle termal analiz yapıp daha sonrada üzerine etkiyen dış yüklerin sebep olduğu gerilmelerle birlikte ısıl ve yapısal analiz yapılmıştır. Ve analiz sonucunda kaynaklı parçada hem artık gerilmelerin hem de dış yüklerin birlikte sebep olduğu deformasyonlar tespit edilmiştir [4]. M. Aydın ve çalışma arkadaşları yaptıkları

çalışmada; difüzyon kaynağı bağlantısı ile kartuş seramik filtre üretimini incelemiştirlerdir. Çalışmada farklı ara tabakalar kullanarak, gözenekli seramik ve paslanmaz çeliği difüzyon kaynağı ile birleştirmişlerdir. Yapılan mikroyapı incelemeleri ve kesme testi sonuçlarına göre, deneylerde gümüş aratabaka kullanarak, 875 °C sıcaklıkta, 0.2 MPa basınçta, 45 dakika (dak) sürede difüzyon kaynağı ile yapılan filtre üretiminin uygun olduğu görülmüştür [5]. M. I. Barrena ve çalışma arkadaşları, Al₂O₃ seramiği ile Ti6Al4V alaşımının, Ag-Cu ara tabakası kullanılarak, difüzyon kaynağı ile birleştirilmesi tekniği üzerine çalışmışlardır. Al₂O₃ seramiği ile Ti6Al4V alaşımının; Ag-Cu ara tabaka kullanılarak difüzyon kaynağı ile birleştirilmesinde en uygun parametrelerin, 750 °C difüzyon sıcaklığı, 3MPa difüzyon basıncı, 10 ile 30 dak arasındaki difüzyon sürelerinde olduğu tespit edilmiştir [6]. J. Zimmerman ve çalışma arkadaşları yaptıkları çalışmalarında; seramik ve metalin sürtünme kaynak sürecinde, difüzyon modellemesini araştırmışlardır. Çalışmada % 97,5 Al₂O₃ içeren korund seramiği ile 6061-T6 alüminyum alaşımının ve yine aynı seramikte % 99,9 Cu içeren elektrolitik bakırın sürtünme kaynağı deneyleri yapılarak, ADINA ve ADINA T olmak üzere iki farklı programda FEM analizleri yapılmıştır. Deneylerden elde edilen verilerle analiz sonuçları karşılaştırılarak analizin gerçeğe uygunluğu tespit edilmiştir [7]. Z. Zhong ve çalışma arkadaşları; W / Ni ara tabaka çiftini kullanarak, difüzyon kaynağı ile birleştirilmiş, SiC ve ferritik paslanmaz çelik malzemelerinin mikroyapısını ve mekanik özelliklerini incelemiştirlerdir. Mikroyapı incelemeleri ve mekanik özelliklerin değerlendirilmesi SiC ve çeliğin kaynağının başarılı olduğunu göstermiştir [8]. J. S. Müller ve çalışma arkadaşları; titanyum alaşımlarının doğrusal sürtünme kaynağı FEM simülasyonunu araştırmışlardır. Çalışmada doğrusal sürtünme kaynak prosesinin tamamı iki farklı koşulda FEM' na göre simüle edilmiştir. Zamana bağlı eksenal kısalma hesaplanarak, analiz sonuçları, mikroyapı ve sertlik değerlerini de içeren deneylerden elde edilen verilerle karşılaştırılmış ve uygunluğu tespit edilmiştir [9]. B. Serier ve çalışma arkadaşları, katı hal kaynağı ile gümüş ara tabaka kullanılarak birleştirilmiş Al₂O₃'in deneysel analizi konusunda çalışmışlardır. Kaynaklı bölgede; birleşme yüzeyinde seramik yüzeyindeki pürüzleri kaplayan metalin sebep olduğu mekanik mekanizma ve güçlü kimyasal bağlar nedeniyle oluşan temel adezyon mekanizması şeklinde 2 çeşit mekanizma olduğu tespit edilmiştir [10]. M. L. Hattali ve çalışma arkadaşları, Al₂O₃ ile HAYNES®214TM alaşımının katı hal kaynağı ile birleştirilmesi konusunu araştırmışlardır. Çalışmada, Al₂O₃/HAYNES® 214TM, Ni ve Cu-Ni-Cu ara tabakaları kullanarak difüzyon kaynağı ile birleştirilmiştir. Al₂O₃/Cu₂O–Cu/Ni/Cu/HAYNES® 214TM birleştirmesinin, Al₂O₃/Ni/HAYNES® 214TM birleştirmesine göre kaynak dayanımının çok daha iyi olduğu tespit edilmiştir [11].

Bu çalışmada ise; Cu ve porselen malzemeler difüzyon kaynağı ile birleştirilerek, FEM'ne göre termal ve yapısal analizleri incelenmiştir. Sıcaklık, basınç ve süre gibi farklı parametrelerde yapılan difüzyon kaynağı deneyleri sonrasında: numunelere kesme testi uygulanarak, kaynaklı bölgenin kesilmeye karşı mukavemeti araştırılmıştır. Kaynaklı numunelerin birleşme yüzeyine dik olarak alınan kesit üzerinde mikro sertlik ölçümleri yapılmıştır. Kesme testi sonuçlarından elde edilen değerlerle, gerçek deney parametreleri eşliğinde, FEM'ne göre, bilgisayar destekli analiz programında, deney numunelerine zamana bağlı termal analiz ve zamana bağlı yapısal analiz yapılmıştır. Analizler için; ANSY 12.1 Workbench programı kullanılmıştır [1].

2. Materyal ve Metot

2.1. Deneysel çalışmalar

Numunelerin birleştirilmesinde, difüzyon kaynağı cihazı kullanılmıştır. Sıcaklık, basınç ve fırın atmosferinin kontrol edilebildiği difüzyon kaynak cihazında, birleştirilecek numunelere mekanik olarak basınç uygulanmaktadır. Koruyucu atmosferin sağlanması için vakum uygulanmış ve deney süresince cihaza % 99,998 saflıkta argon gazı verilmiştir. Koruyucu atmosferin devamlılığı için cihazın bağlantı yerleri, termokupl ve gaz giriş yerleri sızdırmaz yapılmıştır. Şekil 1’de difüzyon kaynak cihazı düzeneği görülmektedir.



Şekil 1. Difüzyon kaynak cihazı düzeneği [12]

2.2. Malzeme ve metot

Çalışmada oksijeni alınmış elektrolitik saf Cu ve izolatör porseleni kullanılmıştır. Kullanılan porselen malzeme; izolatörlerde kullanılan oksitli teknik seramikler grubuna girmektedir. Porselene ait fiziksel özellikler Tablo 1’de ve kimyasal özellikler Tablo 2’de verilmiştir. Deneylerde kullanılan Cu malzemeye ait mekanik özellikler ise Tablo 3’de verilmiştir.

Tablo 1. Porselen malzemeye ait fiziksel özellikler

Eğilme dayanımı (sırsız)	MPa	103,821
Elastikiyet modülü (sırsız)	MPa	$7,19 \times 10^4$
Eğilme dayanımı (sırlı)	MPa	102,068
Elastikiyet modülü (sırlı)	GPa	49,81
Çekme dayanımı (sırsız)	MPa	72,69
Çekme dayanımı (sırlı)	MPa	74,42
Sertlik	HV	746,9

Tablo 2. Porselen malzemeye ait kimyasal özellikler

İçerik	KK	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	Toplam
% Miktarı	4,28	47,93	43,60	0,49	0,61	0,67	0,35	0,93	3,12	99,98

Tablo 3. Saf Cu malzemeye ait mekanik özellikler

Çekme Mukavemeti	% Kopma Uzaması	Sertlik	% Cu	İletkenlik
250 MPa	8,1	80 HB	99,93	57,53 m/Ohm,mm ²

Deneyleerde kullanılan Cu ve porselen numunelerin çapları 15,6 mm ve boyları 40 mm'dir. Deneyleerden önce bakır numuneler 220- 1200 grit silisyum karbür zımpara ile alın yüzeyleri zımparalanmıştır. Zımparalama işleminden sonra, difüzyon yüzeyleri metil alkolle temizlenen Cu ve porselen numuneler, cihazın içindeki pistonlara yerleştirilerek kaynak işlemine hazır hale getirilmiştirlerdir.

2.3. Difüzyon kaynağı parametreleri

Cihaz içerisinde oksijensiz bir atmosfer sağlanması amacıyla; sıcaklık uygulanmadan difüzyon cihazının iç atmosferi öncelikle vakumlanmıştır. Daha sonra deney boyunca, % 99,998 saflıktaki argon gazı verilmiştir. Sıcaklık, basınç ve zaman parametre olarak alınmıştır. Difüzyon kaynağı deneyleeri, ön çalışmalar sonrasında tespit edilen farklı parametrelerde yapılmıştır. Tablo 4'de difüzyon kaynağı parametreleri verilmiştir. Deneyleer esnasında; numunelerin farklı özellikleri de dikkate alınarak, homojen ısı dağılımını sağlayabilmek amacıyla; ısıtma ve soğutma kademeli olarak yapılmıştır.

Tablo 4. Difüzyon kaynağı parametreleri

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Sıcaklık (°C)	875	900	875	900	900	875	900	875	900	900	900	900
Basınç (MPa)	4,5	5,5	4,5	5,5	4,5	5,5	4,5	5,5	5,5	5,5	4,5	4,5
Süre (dak)	45	45	60	60	75	75	90	90	75	90	60	45

Tespit edilen parametrelerde yapılan difüzyon kaynağı deneyleerinde başarılı birleştirmeler sağlanmıştır. Şekil 2'de difüzyon kaynağı ile birleştirilmiş numuneler ve su jetiyle kesit alınmış kaynaklı numune görüntüleri görülmektedir.



(a)



(b)

Şekil 2. (a) Difüzyon kaynağı ile birleştirilmiş numuneler (b) Su jeti ile kesit alınmış kaynaklı numune

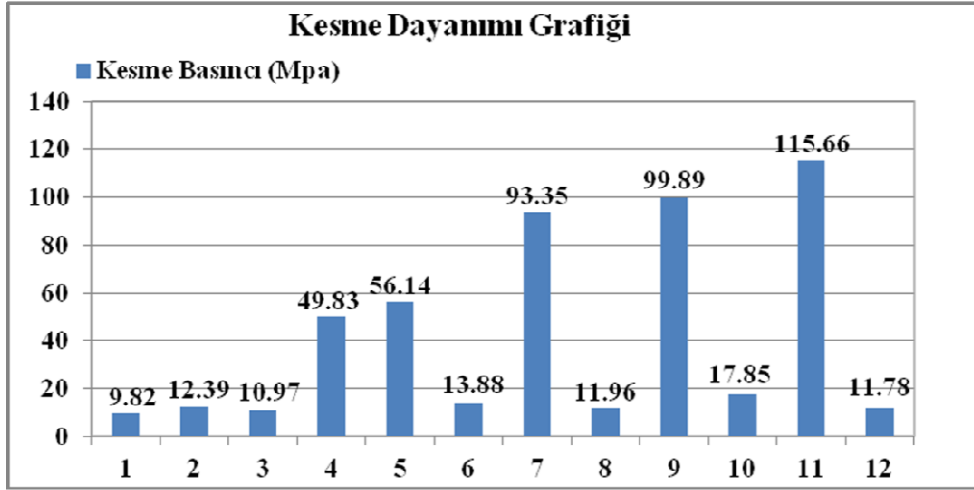
Deneyleer sonrasında yapılan incelemelerde; Cu numunenin renginde kararma görülmüştür. Deney sonrası boyutlar incelendiğinde; kaynaklı Cu-porselen numunesinin toplam boyunda 0,8 mm'lik bir kısalma, çaplarında ise Cu numunede 0,1mm'lik, porselen numunede 0,03 mm'lik bir genişleme olduğu tespit edilmiştir.

2.4. Kesme testi

Difüzyon kaynağı deneyleri sonrasında, başarılı bir şekilde birleştirilen Cu ve porselen numunelere kesme testi uygulanmıştır. Kesme testi sırasında numunelerin ilerleme hızı, 0,5 mm/dak olarak alınmıştır. Kesme testi sonrasında kırılmanın kaynak birleştirme yüzeyinin 1-2 mm ilerisinde ve porselen tarafından gerçekleştiği görülmüştür (Şekil 3). Şekil 4’de kesme dayanımı grafiği verilmiştir.



Şekil 3. Kesme testi sonrası Cu ve porselen numuneler.



Şekil 4. Difüzyon kaynağı kesme dayanımı grafiği

Kesme testi sonuçları incelendiğinde; birleştirme işlemi için 875 °C difüzyon sıcaklığı ve 45 dak difüzyon süresi, dayanımı yüksek bir difüzyon bağlantısının oluşması açısından yetersiz gelmiştir. Kıyaslama yapılabilmesi için orijinal porselen malzemeye de kesme testi uygulanmıştır ve kesme dayanımının 32,4 MPa olduğu tespit edilmiştir. Kaynaklı numunelere yapılan kesme testi sonuçlarına göre; en yüksek kesme dayanımının 115,66 MPa olduğu tespit edilmiştir. Bu sonuç; 60 dak, 900 °C ve 4,5 MPa parametrelerinde yapılan 11 nolu deney numunelerine aittir. 11 nolu deney numunelerine ait kesme dayanımının, orijinal porselenin kesme dayanımına göre 3,56 kat fazla olduğu görülmektedir. Difüzyon kaynağı sonrasında porselen malzemedeki faz oranlarında artışların meydana geldiği ve bu fazların kaynak dayanımını arttırdığı düşünülmüştür.

2.5. Mikrosertlik deneyi

Kaynaklı numunelerin birleşme yüzeyine dik olarak alınan kesit üzerinde mikro sertlik ölçümleri yapılmıştır. Ayrıca Cu ve porselen ana malzemelerine de sertlik ölçümü yapılarak kaynak öncesi ve sonrası sertlikler karşılaştırılmıştır. Numunelere 500 gr yük kullanılarak HV cinsinden sertlik değerleri alınmıştır.

Ana malzemelere ait sertlik değerleri Cu malzeme için 105,57 HV, porselen malzeme için 746,9 HV ölçülmüştür. Tablo 5’de kaynaklı numunelerin sertlik değerleri verilmiştir.

Tablo 5. Kaynaklı numune sertlik değerleri

		Difüzyon Bölgesinden Uzaklık	Sertlik Değeri HV
porselen	Porselen HV	4000	749,8
		3500	763,4
		3000	770,3
		2500	782,5
		2000	811,6
		1500	925,4
		1000	940,3
		500	971,1
		0	75,7
		bakır	Bakır HV
1000	75,5		
1500	82,7		
2000	74,4		
2500	76,5		
3000	66,2		
3500	66,5		
4000	69,3		

Kaynak şartlarının sertlik üzerine etkileri değerlendirildiğinde kaynaklı Cu numunenin sertlik değerinin, orijinal Cu malzemeye göre düştüğü görülmektedir. Porselen numunenin sertlik değerinin ise; kaynak sonrasında yükseldiği, difüzyon bölgesinden uzaklaştıkça bu değer porselenin difüzyon kaynağı öncesi sertlik değerine indiği görülmektedir. Cu numunenin sertlik değerinin düşüş sebebinin; soğuk deformasyon ile imal edilen Cu’ın, difüzyon kaynağı sırasında uygulanan 900 °C’ lik sıcaklık nedeniyle, bir anlamda gerilim giderme tavlama etkisi göstererek, içeriğindeki gerilmelerin kaynak sonrasında azalması nedeniyle meydana geldiği düşünülmektedir. Porselen numunenin sertlik değerinin artış sebebinin; yapı içindeki mevcut fazlardaki artıştan ve yeni fazların oluşmasından kaynaklandığı düşünülmüştür [13,14].

2.6. Sonlu elemanlar analizi

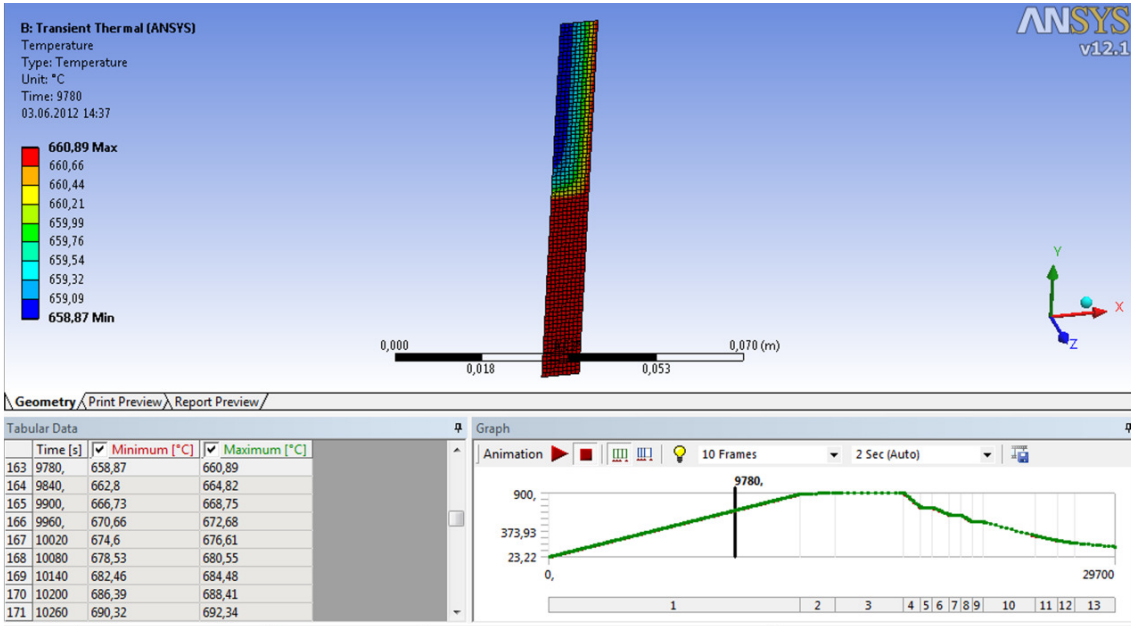
Difüzyon kaynağı ile birleştirilen Cu ve porselen numunelere kaynak sonrasında yapılan mikroyapı incelemeleri ve kesme testi sonuçlarına göre, en iyi kaynak dayanımını gösteren ve en iyi birleştirilmiş kaynaklı numunelerin; 900 °C, 60 dak ve 4,5 MPa parametrelerinde yapılan 11 nolu deney numunelerine ait olduğu tespit edilmiştir. 11 nolu deney parametreleri ile birleştirilen kaynaklı Cu-porselen numunelerine; FEM’ne göre, bilgisayar destekli analiz programında zamana bağlı termal ve zamana bağlı yapısal analizler yapılmıştır. Analizler ANSYS 12.1 Workbench programında gerçekleştirilmiştir. Analizlerde esas alınan, 11 nolu numuneye ait difüzyon kaynağı deneyleri sırasında, cihaz 15000 saniye (s) sonra 900 °C difüzyon sıcaklığına getirilmiştir ve 18600 s’ye kadar bu sıcaklıkta tutulmuştur. 18600 s ile 22800 s arasında kademeli soğutma yapılmıştır. 22800 s ‘den sonra 29700 s ‘ye kadar kendi halinde soğumaya bırakılmıştır. 15000 s ile 20100 s arasında 4,5 MPa’lık difüzyon basıncı uygulanmıştır. Cihaz içi sıcaklık değerleri S tipi termokupl vasıtası ile ölçülmeye devam edilmiştir. Analizler için gerekli olan zamana bağlı sıcaklık ve basınç koşulları, uygulamayla aynı olacak şekilde programa girilmiştir.

Öncelikle kaynaklı Cu-porselen numunenin modellemesi yapılmıştır. Modelleme ANSYS Design Modeler da oluşturulmuştur. Porselen üstte Cu altta olacak konumda, 2D Axisymmetric olarak modelleme yapılmıştır. Deneylede kullanılan Cu ve porselen malzemelerin yapısal ve termal özellikleri Engineering Data bölümüne girilmiştir. Analizler gerçek deney şartlarına uygun olarak yapılmıştır.

2.7. Zamana bağlı termal analiz

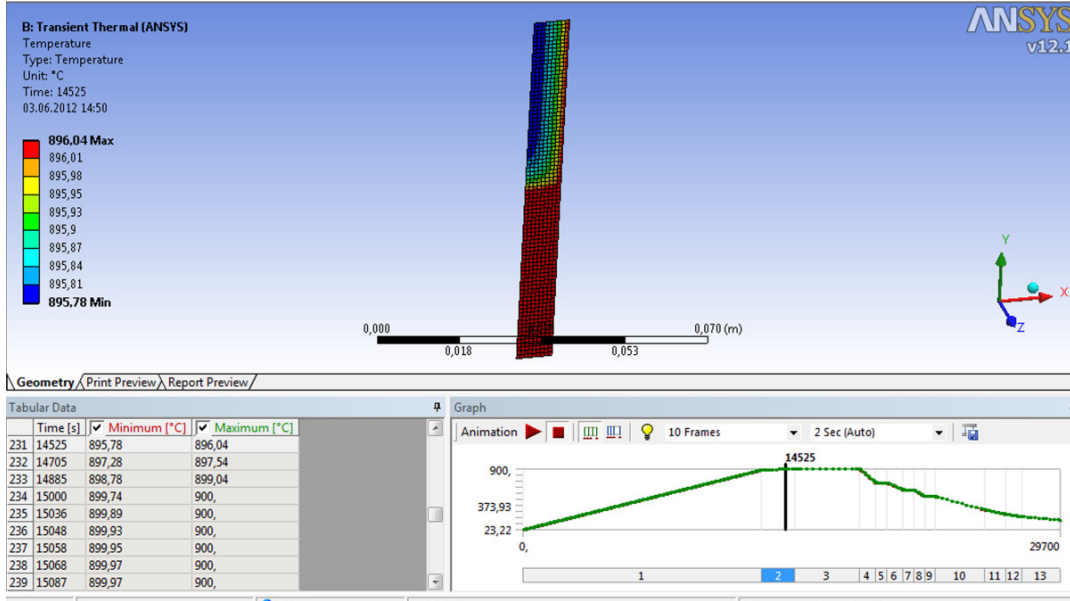
Gerçek ölçülerine göre modellemesi yapılarak, malzeme özellikleri girilen numuneler quadrilaterals (köşeli) elemanla meshlenmiştir. Modelin Cu tarafında 1295, porselen tarafında 1295 olmak üzere, toplamda 2590 düğüm noktası ve Cu tarafında 396, porselen tarafında 396 olmak üzere, toplamda 792 köşeli elemanla meshleme yapılmıştır. Zamana bağlı termal analiz için gerekli olan; deney sırasında ölçülen sıcaklık değerlerinin, veri girişi yapılmıştır. Daha sonra zamana bağlı sıcaklık grafiğinde istenilen zaman seçilerek çözümlene yapılmıştır.

Şekil 5’de deneye başladıktan 9780 saniye sonraki zamana bağlı termal analiz gösterilmektedir. Isıtma esnasında 9780. saniyedeki; Cu numunenin her tarafındaki sıcaklık 660,66 °C iken, porselen numunenin iç kısımlarında 658,87 °C olan sıcaklık değerinin dış kısımlara doğru kademeli olarak 660,89 °C’ ye yükseldiği görülmektedir.



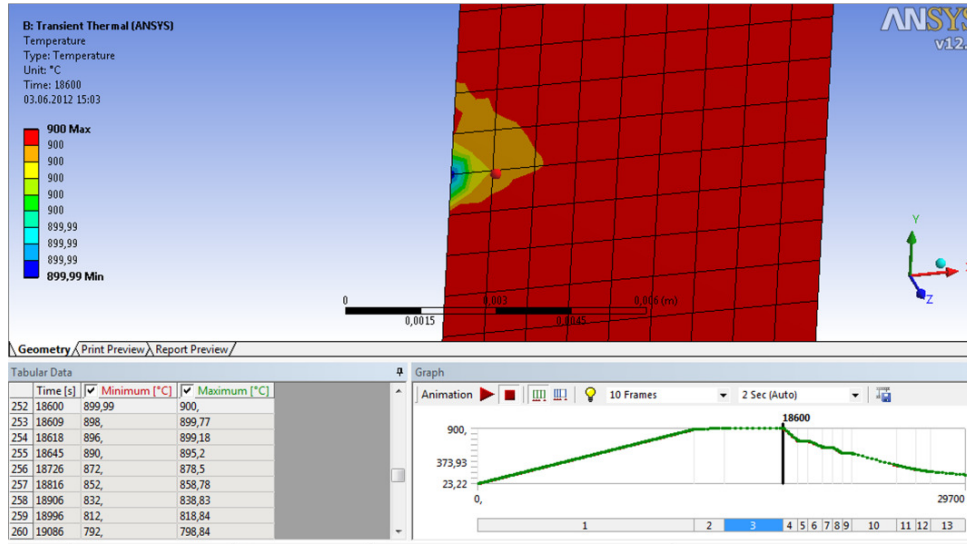
Şekil 5. Deneye başladıktan 9780 s sonra ısınma esnasındaki zamana bağlı termal analiz

Deneye başladıktan sonraki 14525. saniyede zamana bağlı termal analizde, Cu numunenin her tarafındaki sıcaklık 896,01 °C iken, porselen numunenin iç kısımlarında 895,78 °C olan sıcaklık değerinin dış kısımlara doğru kademeli olarak 896,01 °C’ ye yükseldiği görülmektedir (Şekil 6).



Şekil 6. Deneye başladıktan 14525 s sonra difüzyon işlemi esnasındaki zamana bağlı termal analiz

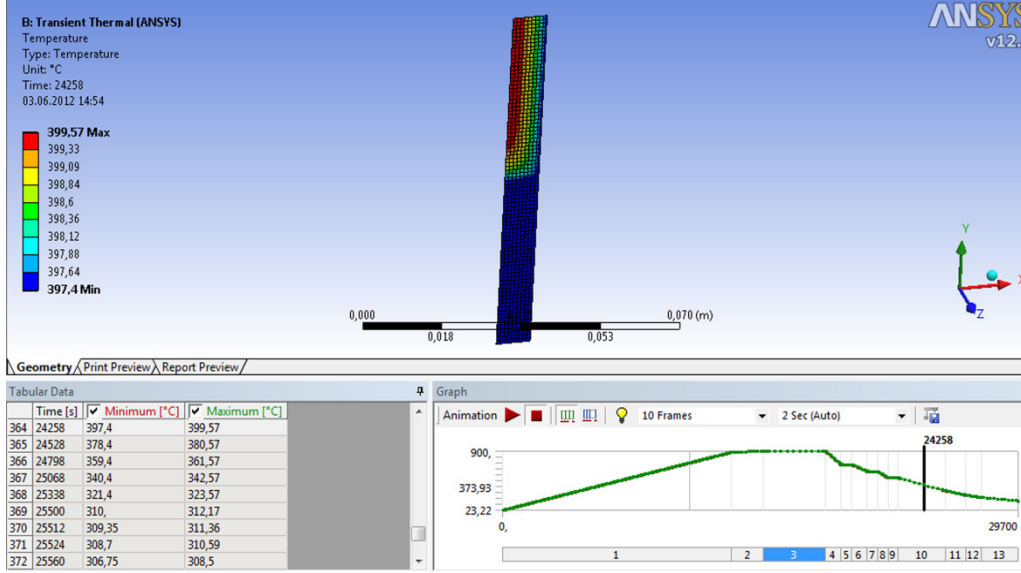
Difüzyon süresinin bitimindeki 18600 saniyede zamana bağlı termal analiz, (porselen ve Cu'ın kaynak ara yüzeyi) Şekil 7'de gösterilmektedir. Cu numunenin her tarafındaki sıcaklık 900 °C iken, porselen numunenin hemen hemen her bölgesinde 900 °C olan sıcaklık değerinin, kaynak yüzeyine yakın iç bölümünde ise 899,99 °C olduğu görülmektedir.



Şekil 7. Deneye başladıktan 18600 s sonra difüzyon süresi bitimindeki zamana bağlı termal analiz (porselen ve bakırın kaynak ara yüzeyi)

Şekil 8'de deneye başladıktan 24258 saniye sonraki zamana bağlı termal analiz gösterilmektedir. Soğutma işlemi esnasında; Cu numunenin her tarafındaki sıcaklık 397,4 °C iken, porselen numunenin iç kısımlarında 399,57 °C olan sıcaklık değerinin dış kısımlara doğru kademeli olarak 397,4 °C' ye indiği görülmektedir. Deneye

başlandıktan sonraki 29364. saniyede soğutma işlemi sırasında zamana bağlı termal analizde; bakır numunenin her tarafındaki sıcaklık 168 °C iken, porselen numunenin iç kısımlarında 168,73 °C olan sıcaklık değerinin dış kısımlara doğru kademeli olarak 168 °C' ye indiği gözlenmiştir.



Şekil 8. Deneye başladıktan 24258 s sonra soğutma işlemi esnasındaki zamana bağlı termal analiz

Analizlerden görülmektedir ki; Cu numunede sıcaklığın yayılımı açısından homojen bir görünüm izlenirken, porselen numunede ise heterojen bir görünüm izlenmektedir. Cu malzemeler yüksek ısı ve elektrik iletkenliği özelliklerine sahiptirler. İzolatör porseleni ise ısıya ve elektriğe karşı gösterdiği direnç nedeniyle yalıtkan malzeme olarak kullanımıyla bilinmektedir. Malzemelerin iletkenlik özelliklerine bağlı olarak, porselen Cu'a göre daha geç ısınır, soğumaktadır. Bu sıcaklık farkı özellikle porselenin iç bölgelerinde gözlenmektedir. Deneyler esnasında difüzyonun başlangıcında her iki numunenin de difüzyon sıcaklığı olan 900 °C'ye ulaştığı analizler sonucunda da görülmüştür.

2.8. Zamana bağlı numunelerin yapısal analizi

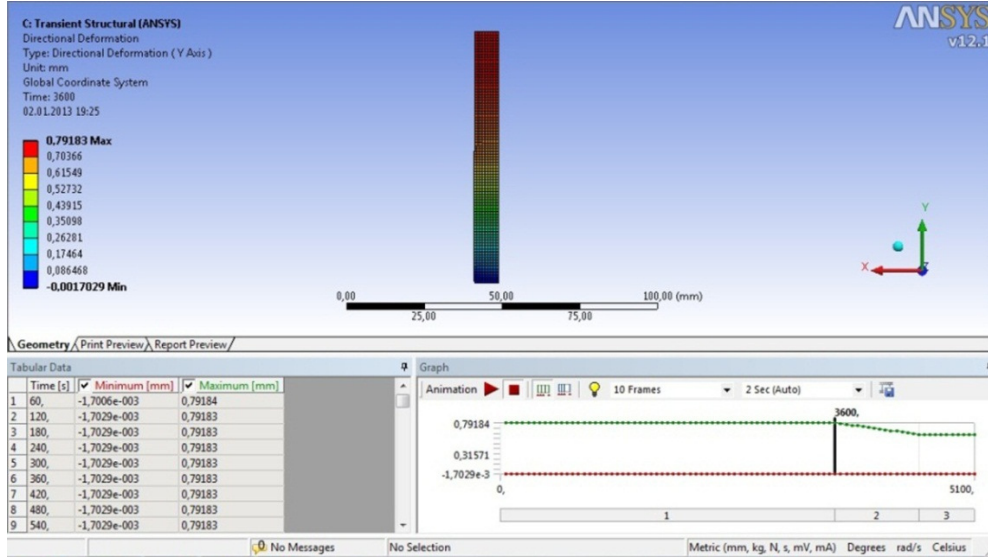
Gerçek ölçülerine göre, porselen üstte, bakır altta olacak konumda 2D Axisymmetric modellemesi yapılarak, malzeme özellikleri girilen numuneler, termal analiz sırasında uygulandığı gibi, aynı şekilde meshlenmiştir. Termal analiz sonuçlarından elde edilen değerler korunarak, difüzyon süresi başlangıcından itibaren numunelerin üst yüzeyinden 4,5 MPa'lık basınç uygulanmış ve 5100 s sonunda kaldırılmıştır.

Analizler esnasında eşdeğer gerilme değerinin değişimi incelenmiştir. Difüzyon süresinin bitimi olan, basınç uygulamasının 3600. saniyesindeki eşdeğer gerilme değeri porselenin ve Cu'ın pek çok bölgesinde 0,424 MPa olduğu gözlenirken, özellikle kaynak bölgesinde ve Cu numunenin alt kısımlarında 6338,5 MPa olarak elde edilmiştir.

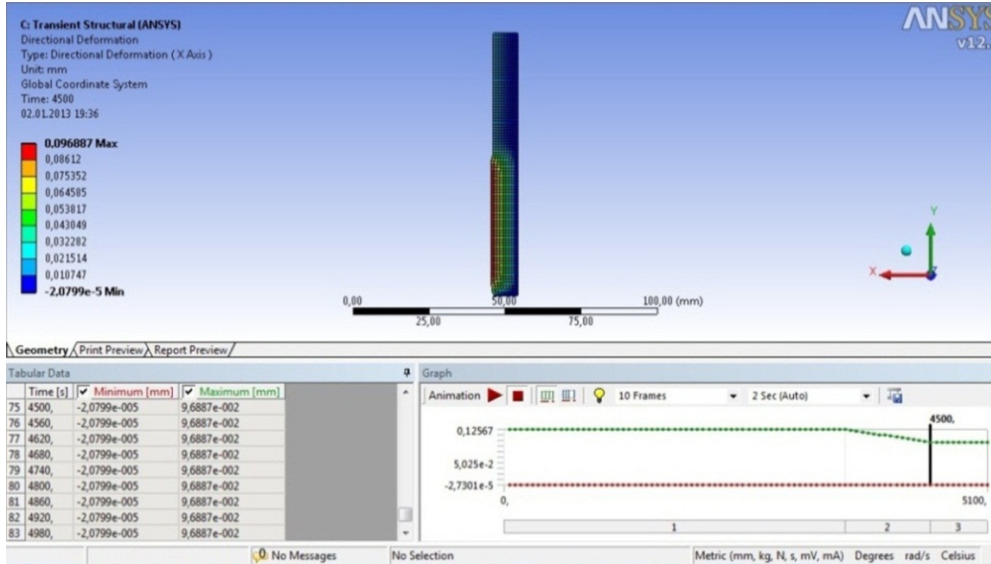
Difüzyon süresinin bitimi olan, basınç uygulamasının 3600. saniyesindeki; y yönündeki doğrusal deformasyon değerinin numunelerin toplam boyunda 0,7918 mm'lik kısılma olarak görülmektedir. x yönündeki doğrusal deformasyon değeri, numunelerin çapında

genişleme olarak tespit edilmiştir. Çaptaki genişlemenin toplamda 0,126 mm olarak izlendiği ve özellikle Cu numunede daha fazla olduğu tespit edilmiştir.

Basınç uygulanmasının 4500. saniyesindeki y yönündeki doğrusal deformasyon değeri numunelerin toplam boyunda kısalma olarak izlenmektedir. Bu değişim 0,7918 mm olduğu Şekil 9'da görülmektedir. Basınç uygulamasının 4500. saniyesindeki x yönündeki doğrusal deformasyon değeri numunelerin çapında genişleme olarak görülmüştür. Toplamda 0,126 mm olan çaptaki genişlemenin; Cu numunede 0,096 mm, porselen numunede 0,03 mm olduğu tespit edilmiştir (Şekil 10).



Şekil 9. Basınç uygulanmaya başladıktan 4500 s sonra y yönündeki doğrusal deformasyon değeri



Şekil 10. Basınç uygulanmaya başladıktan 4500 s sonra x yönündeki doğrusal deformasyon değeri

Difüzyon kaynağı sırasında; numunelere uygulanan basınç işlemi, 5100 saniye sonra kaldırılmaktadır. Difüzyon süresinin bitimi olan ve basınç uygulamasının 3600.

saniyesi ile basınç uygulamasının kaldırıldığı 5100. saniye arasında deformasyon ve eşdeğer gerilme sonuçları değişmemektedir. Difüzyon süresi bittiğinde yapısal deformasyonlar da bitmiş olmaktadır. Yapısal analiz sonuçlarından görülmektedir ki; basınç uygulamasının kaldırıldığı 5100. saniyede, kaynaklı Cu-porselen numunesinin boyunda yaklaşık olarak 0,7918 mm lik bir kısalma, çaplarında ise; Cu numunede 0,096 mm' lik, porselen numunede 0,03 mm'lik bir genişleme olduğu gözlenmektedir. Deneyle sonrasında yapılan ölçümlerle, analiz sonucunda elde edilen değerlerin çok yakın olduğu tespit edilmiştir.

3. Sonuçlar

1. Bu çalışmada difüzyon kaynağı ile birleştirilmiş Cu ve porselen malzemelerin sonlu elemanlar yöntemine göre bilgisayar destekli analiz programında, termal ve yapısal analizleri araştırılmıştır.
2. Mekanik özelliklerin incelenmesi sonucunda; 4,5 MPa'da, 60 dak'da ve 900 °C deney şartlarında yapılan 11 nolu deney numunelerinin en yüksek kaynak dayanımına ulaştığı görülmüştür.
3. Deneyle sonrasında kaynaklı numunelerin ve kaynaklanmamış ana malzemelerin sertlik ölçümü yapılarak, kaynak öncesi ve sonrası sertlikler karşılaştırılmıştır. Kaynak işlemi sonrasında; porselen numunenin sertliğinde artış, Cu numunenin sertliğinde düşüş tespit edilmiştir.
4. Deneylelerden sonra yapısal açıdan numunelerin boyutları ölçüldüğünde; kaynaklı numunenin toplam boyunda 0,8 mm'lik bir kısalma, çaplarında ise özellikle Cu numunede daha belirgin olarak izlenen 0,1mm' lik bir genişleme, porselen numunede ise; 0,03 mm'lik bir genişleme olduğu tespit edilmiştir.
5. Sonlu elemanlar yöntemiyle deney şartları dikkate alınarak zamana bağlı termal ve yapısal analizler yapılmıştır. Difüzyon kaynağı deneyle sonrasında elde edilen sonuçlar ile termal ve yapısal analiz sonuçları karşılaştırılmıştır. Termal analiz sonuçlarının değerlendirilmesi sonrasında; Cu ve porselen malzemelerin ısı iletim farklılıklarından kaynaklanan ve kaynaklı birleştirmelerde mikro çatlak oluşumları gibi istenmeyen sonuçlar yaratan heterojen ısı dağılımı, deney sırasında ısıtma ve soğutma süreleri ayarlanarak önlenmiştir. Analiz sonuçlarından yola çıkarak; daha sonra farklı malzeme çiftleriyle de yapılacak olan çalışmalarda, malzemelerin ısı iletkenlik özelliklerinden kaynaklanan ısı dağılımı farklarının giderilebileceği düşünülmüştür.
6. Yapısal analiz sonuçları değerlendirilmesi sonrasında; numunelerin toplam boyunda 0,798 mm' lik bir kısalma, çaplarında ise özellikle Cu numunede 0,096 mm' lik bir genişleme, porselen numunede 0,03 mm'lik bir genişleme olduğu tespit edilmiştir. Deneyle sonrasında numune boyutlarının ölçüm değerleri ile analiz sonuçlarından elde edilen değerler karşılaştırıldığında; boyut değişimlerinin birbirine çok yakın olduğu tespit edilmiştir.

Kaynaklar

- [1]. Tolun, F., Bakır ve porselen malzemelerin difüzyon kaynağı ile birleştirilebilirliğinin incelenmesi ve analizi, Doktora Tezi, Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, (2013).
- [2]. Sinnott, S.B. and Dickey, E.C., Ceramic/metal interface structures and their relationship to atomic and meso-scale properties, **Materials Science and Engineering**, 43(1-2), 15, 1-59, (2003).
- [3]. Benli, S., Kaynaklı parçalarda oluşan artık gerilmelerin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, (2004).
- [4]. TOLUN, F., Yük taşıtlarının taşıyıcı aksamalarının gerçek yol yükleri altında analizi, Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, (2006).
- [5]. Aydın, M., Şan, O. ve Özgür, C., Difüzyon kaynağı bağlantısı ile kartuş seramik filtre üretimi, TÜBİTAK 106M147, Kütahya, (2007).
- [6]. Barrena, M.I., Matesanz, L. and Gómez de Salazar, J.M., Al₂O₃/Ti6Al4V diffusion bonding joints using Ag–Cu interlayer”, **Materials Characterization**, 60(11), 1263-1267, (2009).
- [7]. Zimmerman, J., Wlosinski, W., Lindemann, Z.R., Thermo-mechanical and diffusion modelling in the process of ceramic–metal friction welding, **Journal of Materials Processing Technology**, 209(1644–1653), (2009).
- [8]. Zhong, Z., Hinoki, T., Jung, H.C., Park, Y.H. and Kohyama, A., Microstructure and mechanical properties of diffusion bonded SiC/Steel joint using W/Ni interlayer, **Materials & Design**, 31(3), 1070-1076, (2010).
- [9]. Müller, J.S., Rettenmayr, A., Schneefeld, D., Roder, O. and Fried, W., FEM simulation of the linear friction welding of titanium alloys, **Computational Materials Science**, 48(749-758), (2010).
- [10]. Serier, B., Bouiadjra, B. B., Belhouari, M. and Treheux, D., Experimental analysis of the strength of silver–alumina junction elaborated at solid state bonding, **Materials & Design**, 32(7), 3750-3755, (2011).
- [11]. Hattali, M.L., Valette, S., Ropital, F., Mesrati, N. and Treheux, D., Interfacial behavior on Al₂O₃/HAYNES® 214™ joints fabricated by solid state bonding technique with Ni or Cu–Ni–Cu interlayers, **Journal of the European Ceramic Society**, 32(10), 2253-2265, (2012).
- [12]. Çelik, S., Koruyucu gaz altında saf alüminyum ve bakırın difüzyon kaynağı şartlarının belirlenmesi, Doktora Tezi, Balıkesir Üniversitesi, (1996).
- [13]. Kazakov, N.F., **Diffusion Bonding of Materials**, (Edt: Russian: Kuznetsov, B.V.), Pergamon Pres, (1985).
- [14]. Ferro, R., Saccao, A., **Intermetallic Chemistry**, (Edit: Chan, R, W.), Pergamon Materials Serie 4s, Elsevier Ltd., (2008).