

PARTİKÜL TAKVİYELİ ALÜMİNYUM ESASLI METAL MATRİS KOMPOZİTLERİN DİFÜZYON KAYNAK KABİLİYETLERİNİN İNCELENMESİ

Sertan Ozan*

Araş Gör., Ege Üniversitesi,
Makine Mühendisliği Bölümü,
Bornova-İzmir
sertan.ozan@ege.edu.tr

Serdar Karaoğlu

Yrd. Doç. Dr., Ege Üniversitesi,
Makine Mühendisliği Bölümü,
Bornova-İzmir
serdar.karaoglu@ege.edu.tr

Rasim İpek

Prof. Dr., Ege Üniversitesi,
Makine Mühendisliği Bölümü,
Bornova-İzmir
rasim.ipek@ege.edu.tr

ÖZET

Modern mühendislik malzemeleri olan Metal Matrisli Kompozitlerin (MMK), klasik metallere göre birçok avantajları mevcuttur. MMK malzemelerin klasik metallerin yerine kullanılmasıyla birlikte daha yüksek mukavemet/ağırlık oranı, aşınma direnci, sürünme dayanımı ve kırılma tokluğu elde edilebilir. MMK malzemelerin tüm bu avantajlarına rağmen, kullanım alanlarını kısıtlayan en büyük engel, bu malzemelerin birleştirme işlemlerinde karşılaşılan zorluklardır. Bu çalışmada, MMK malzemeler arasında yüksek kullanım oranına sahip alüminyum esaslı metal matris kompozitlerin difüzyon kaynağı ile birleştirilmelerinde ara yüzey elemanı, kararlı ve kararsız oksit tabakası oluşumu, ara yüzeydeki mikro birleşim tipi, takviye hacim oranı, matris malzemesi, sıcaklık, basınç ve sürenin kaynaklı birleştirmenin mikroyapı ve mekanik özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Difüzyon kaynağı, metal matrisli kompozit, arayüzey, mikroyapı

Investigation of Diffusion Welding Capabilities of Particle Reinforced Aluminum Matrix Composites

ABSTRACT

Metal Matrix Composites (MMCs) are modern engineering materials which have more advantages when compared to conventional materials. With the use of MMCs instead of conventional materials, higher strength/weight ratio, wear resistance, creep strength, fracture toughness can be obtained. Despite all these advantages of MMCs, the biggest obstacle to restrict the common usage of these materials is the difficulty of joint process. In this study, the diffusion welding capability of aluminum-based metal matrix composites was investigated. Effects of the formation of stable and unstable oxide layer at the interface, reinforcement volume fraction, matrix material, micro-bonding type, bonding temperature, pressure, duration on the microstructure and mechanical properties of joints were investigated.

Keywords: Diffusion welding, metal matrix composites, interface, microstructure

* İletişim yazarı

Geliş tarihi : 06.07.2012

Kabul tarihi : 07.08.2012

20-21 Ekim 2011 tarihlerinde Makina Mühendisleri Odası tarafından İstanbul'da düzenlenen Geleceğin Teknolojileri Sempozyumu'nda sunulan bildiri, yazarınlarca güncellenerek ve genişletilerek bu makale hazırlanmıştır.

Ozan, S., Karaoğlu, S., İpek, R. 2012. "Partikül Takviyeli Alüminyum Esaslı Metal Matris Kompozitlerin Difüzyon Kaynak Kabiliyetlerinin İncelenmesi," TMMOB MMO Mühendis ve Makina Dergisi, cilt 53, sayı 630, s. 45-53.

1. GİRİŞ

MMK malzemeler, mühendislik uygulamalarında düşük yoğunluğa ve yüksek mukavemet/ağırlık oranına sahip olmasından dolayı son yıllarda önemli araştırma konularından biri haline gelmiştir. MMK malzemeler, kompozit malzemelerin bir grubunu oluşturan, diğer tüm kompozit malzemeler gibi kimyasal ve fiziksel olarak farklı olan en az iki faz içeren geleneksel malzemelere göre daha yüksek aşınma direnci, mukavemet/ağırlık oranına sahip modern mühendislik malzemeleridir [1].

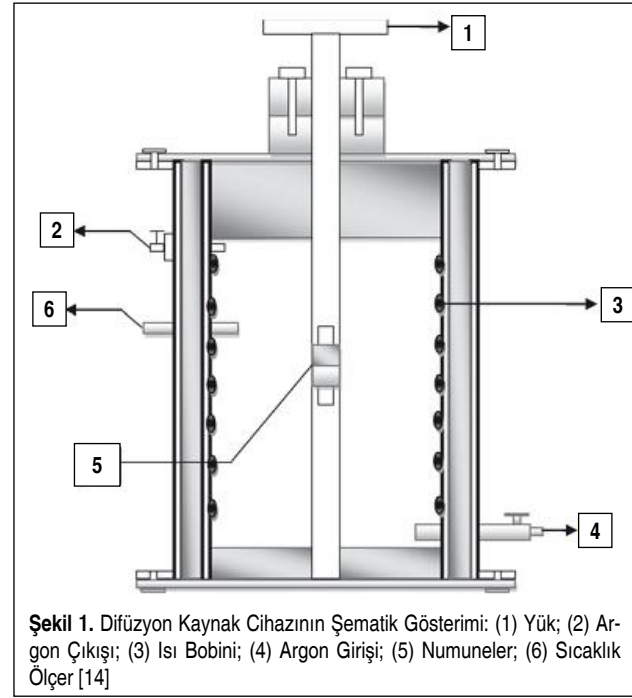
MMK malzemeler, havacılık ve uzay endüstrisinin yüksek özgül dayanım ve rijitliğe sahip malzeme gereksiniminde vazgeçilemez malzeme grubudur [2]. Partikül takviyeli MMK malzemeler, sürekli fiber takviyeli kompozit malzemelerle kıyaslandığında maliyetinin daha düşük olması [3], yüksek aşınma direnci ve ısıl kararlılık özellikleriyle ön plana çıkmaktadırlar [2]. Matris malzemesi olarak genellikle Al, Mg, Fe, Ti, Ni, Cu, Ag, Co, Nb malzemeleri kullanılmaktadır [3]. Matris malzemeleri içerisinde Al, Ti ve Mg yaygın olarak kullanılmaktadır [1]. Dayanım, düşük yoğunluk, yüksek korozyon direnci ve düşük maliyet özelliklerinden dolayı en fazla kullanılan malzeme ise alüminyumdur [2]. Alüminyum esaslı metal matris kompozitlerin ergitme kaynak yöntemleri [4,5], difüzyon kaynağı [6-43], sürtünme karıştırma kaynağı [44-54] ile birleştirilebilirliği birçok araştırmacı tarafından incelenmiştir. Kaynak bölgesinde oluşan ve önlenemeyen bazı yaygın kusurlar yüzünden, ergitme kaynak yöntemlerinin yetersiz kaldığı alüminyum esaslı MMK malzemelerin birleştirilmesinde, katı hâl kaynak yöntemleri daha iyi sonuçlar vermektedir. Bir katı hâl kaynak yöntemi olan "difüzyon kaynağı"nın alüminyum esaslı MMK malzemelere uygulanabilirliği, yöntemin bu alandaki önemini arttırmakta ve araştırmacıların ilgisini çekmektedir.

Alüminyum esaslı MMK malzemelerin, yaygın endüstriyel kullanımlarının önündeki başlıca engel birleştirme işlemlerinde karşılaşılan zorluklardır [6-9]. Alüminyum esaslı MMK malzemelerin difüzyon kaynağında birleştirilecek olan parçaların yüzeylerinde oluşan oksit tabakaları, difüzyon için engel teşkil etmektedir. Kaynak işlemi öncesi etkili bir yüzey temizliği ön şart olmakla birlikte birleştirme yüzeylerinde metalik bağın oluşabilmesi ve etkili bir difüzyon sürecinin gelişebilmesi için yüzeyin oksit tabakasından arındırılması, bununla birlikte oksit tabakasının kaynak işlemi esnasında da oluşmaması için gerekli tedbirlerin alınması oldukça önemlidir [10].

Bu çalışmada, partikül takviyeli alüminyum esaslı metal matris kompozitlerin (PTAMK) difüzyon kaynağı ile birleştirilmelerinde; ara yüzey elemanı, kararlı ve kararsız oksit tabakası oluşumu, ara yüzeydeki mikro birleşim tipi, takviye hacim oranı, matris malzemesi, sıcaklık, basınç ve sürenin kaynaklı birleştirilmenin mikroyapı ve mekanik özellikleri üzerindeki etkisi incelenmiştir.

2. KATI HÂL DİFÜZYON KAYNAĞI

Difüzyon kaynağı; sıcaklık, basınç ve birleştirme süresiyle kontrol edilebilen, alüminyum esaslı MMK malzemeler gibi kimyasal olarak kararlı oksit tabakasına sahip olan malzemelerde difüzyon olayının meydana gelebilmesi için etkili bir yüzey temizliğine ihtiyaç duyulan, genellikle koruyucu gaz veya vakum altında gerçekleştirilen bir kaynak yöntemidir [11-13]. Difüzyon kaynağı katı ve sıvı faz difüzyon kaynağı olarak iki ana gruba ayrılır. Şekil 1'de difüzyon kaynak cihazı şematik olarak gösterilmiştir [54].

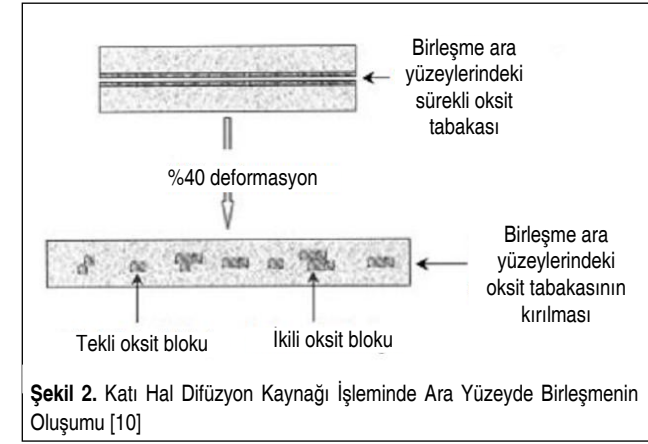


Şekil 1. Difüzyon Kaynak Cihazının Şematik Gösterimi: (1) Yük; (2) Argon Çıkışı; (3) Isı Bobini; (4) Argon Girişi; (5) Numuneler; (6) Sıcaklık Ölçer [14]

PTAMK malzemelerin difüzyon kaynak kabiliyetlerini olumsuz yönde etkileyen yüzeyde oluşan kararlı oksit tabakalarının ortadan kaldırılması ve süreksiz hâle getirilmesi oldukça önemlidir. Bu bağlamda, alüminyum alaşımların oksit tabakalarının süreksizleştirilmesine yönelik yapılan çalışmalar, PTAMK malzemelerin difüzyon kaynak kabiliyetlerinin iyileştirilmesinde esas alınabilir.

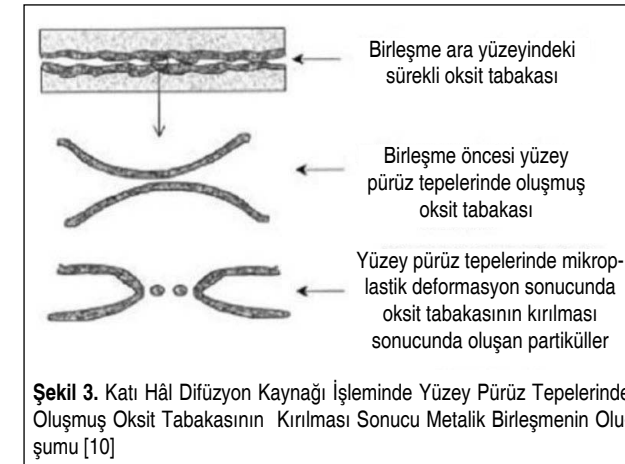
Alüminyum alaşımların ve kompozitlerin katı hâl difüzyon kaynağı ile birleştirilmelerinde yüzeyde oluşan oksit tabakalarının kimyasal olarak kararlı olmasından dolayı, bu durum sağlam bir birleşme ara yüzeyi elde etmek için engel teşkil eder [17]. Bakır, titanyum, tantal, niyobyum, zirkonyum gibi malzemelerinin yüzeylerinde oluşan oksit filmleri birleştirme sıcaklıklarında kararsız hâle gelirler ve basınç etkisiyle kolaylıkla bozunurlar [10].

Alüminyum esaslı MMK malzemelerin, katı hâl difüzyon kaynağı işlemi sırasında uygulanan basınç et-



Şekil 2. Katı Hal Difüzyon Kaynağı İşleminde Ara Yüzeyde Birleşmenin Oluşumu [10]

kisiyle kararsız hâle getirilebilir [17]. Şematik olarak Şekil 2'de [10] görüldüğü gibi birleştirme esnasında basıncın uygulanmasıyla birlikte; ara yüzeyde bulunan gevrek karakterdeki oksit tabakası kırılır ve süreksiz duruma geçer [10]. Oksit tabakasının, uygulanan basıncın etkisiyle bölgesel olarak ortadan kalkması, birleşme ara yüzeyinde metal/metal teması sağlar. Birleştirme yüzeylerinde metalik bağ oluşabilmesi ve etkili bir difüzyon sürecinin gelişebilmesi daha fazla basıncın uygulanmasıyla mümkün olmakla birlikte, uygulanan basıncın yüksek olması durumunda birleştirilecek parçalarda şekil değişimlerinin olması muhtemeldir [9]. Daha önce yayınlanmış olan çalışmalarda, alüminyum alaşımların katı hâl difüzyon kaynağı işlemi %40 mertebesinde uygulanan plastik deformasyon miktarının olumlu sonuçlar verdiği saptanmıştır [10].

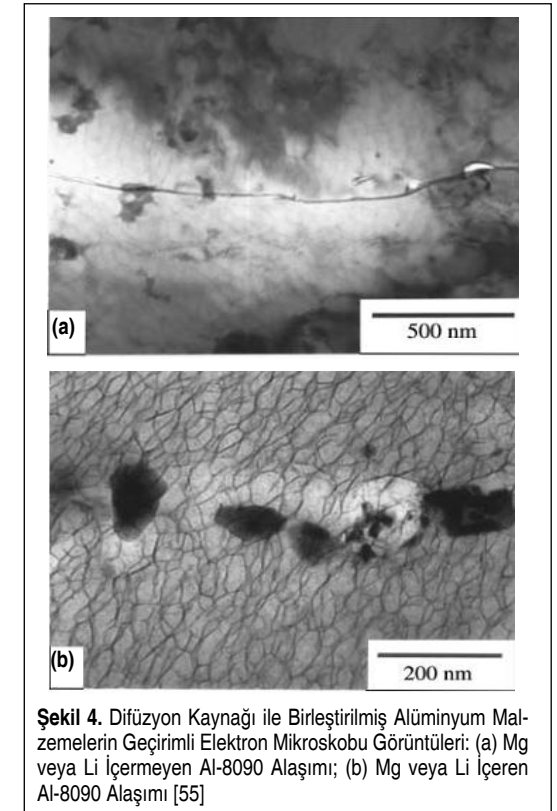


Şekil 3. Katı Hâl Difüzyon Kaynağı İşleminde Yüzey Pürüz Tepelerinde Oluşmuş Oksit Tabakasının Kırılması Sonucu Metalik Birleşmenin Oluşumu [10]

Katı hâl difüzyon kaynağı işlemi, oksit tabakası oluşumu probleminin ortadan kaldırılmasında yüksek yüzey pürüzlülüğü değerlerine sahip alüminyum alaşımlarda, düşük yüzey pürüzlülüğü değerine sahip olan alüminyum alaşımlara göre birleşme ara yüzeyinde daha iyi kesme dayanımı elde edilmiştir [15]. Şematik olarak Şekil 3'te [10] görüldüğü gibi yüzey pürüzlülüğü değerinin artmasıyla birlikte yüzey pürüz tepeleri daha fazla plastik deformasyona uğrar, dolayısıyla

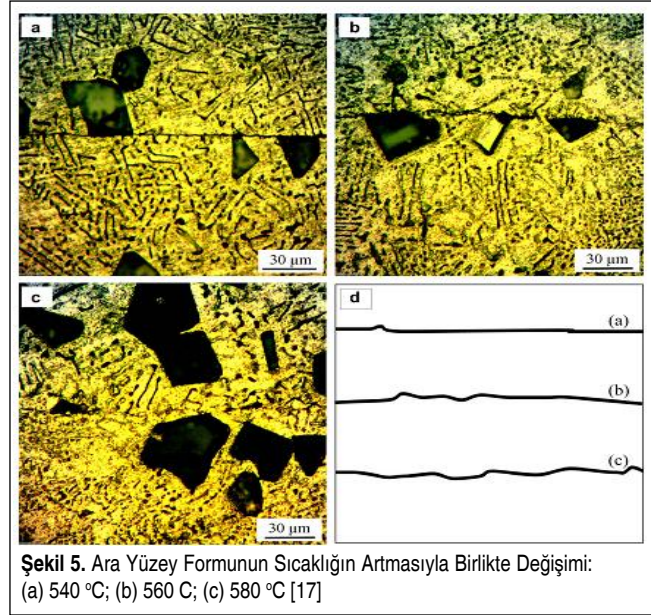
daha fazla miktarda oksit tabakasında kırılma meydana gelecek metal/metal temas oranı artar [9]. Al-8090 alaşımının katı hâl difüzyon kaynağı işlemi, ara yüzey birleşme kesme dayanımının, yüzey pürüzlülüğü yüksek malzemelerde arttığı belirlenmiştir [10,15]. Ancak, Nicholas ve arkadaşlarının [16] farklı yüzey pürüzlüklerine sahip bakır malzemelerle gerçekleştirdikleri difüzyon kaynağı işlemi, yüzey pürüzlülüğü fazla olan bakır malzemelerin birleştirme işlemi daha düşük kesme dayanımı elde edilmiştir, bu durum, bakır oksit tabakası ile alüminyum oksit tabakasının farklı özelliklere sahip olmasından kaynaklanmaktadır [10].

Alüminyum alaşımların katı hâl difüzyon kaynağı işlemi, magnezyum, lityum gibi alaşım elementlerinin birleşme ara yüzeyinin kesme dayanımı üzerindeki etkisi, farklı araştırmacılar tarafından incelenmiştir [55]. Alüminyum alaşım içerisinde bulunan bu elementlerin kimyasal olarak ara yüzeyde bulunan oksit tabakasıyla etkileşime girdiği ve sürekli ve amorf yapıdaki bu tabakayı süreksizleştirdiği, dolayısıyla metal/metal temasını artırdığı belirtilmiştir [55,10]. Şekil 4a'da [55] lityum ve magnezyum içermeyen Al-8090 alaşımının sürekli oksit tabakasını gösteren TEM görüntüsü verilmiştir. Buna karşılık Şekil 4b'de [55] lityum ve magnezyum içeren Al-8090 alaşımının süreksiz durumdaki oksit tabakası verilmiştir. Birleştirme ara yüzeylerinde metalik bağ oluşabilmesi ve etkili bir difüzyon sürecinin gelişebilmesinde, magnezyum elementinin lityumdan daha etkili olduğu belirtilmiştir [10,55].

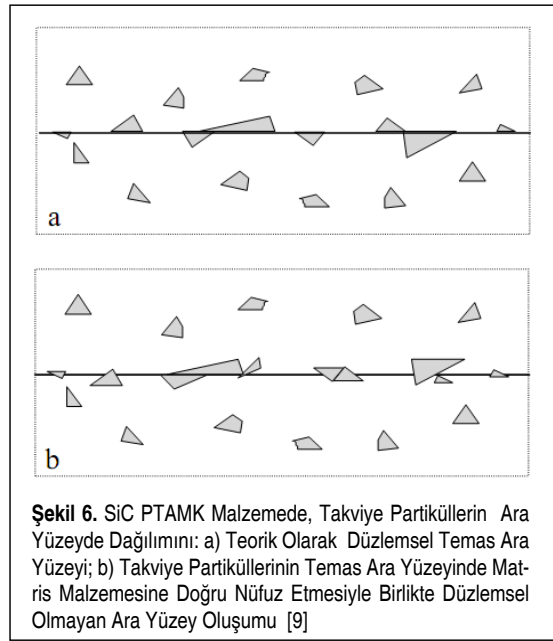


Şekil 4. Difüzyon Kaynağı ile Birleştirilmiş Alüminyum Malzemelerin Geçirimli Elektron Mikroskobu Görüntüleri: (a) Mg veya Li içermeyen Al-8090 Alaşımı; (b) Mg veya Li içeren Al-8090 Alaşımı [55]

Nami ve arkadaşları [17], in-situ (yerinde oluşan) yöntemini kullanarak üretmiş oldukları Al/Mg₂Si MMK malzemelerin kaynağında birleştirme sıcaklığının, birleşme süresinden daha etkili olduğunu ortaya koymuşlardır. Şekil 5'te [17] sıcaklığın artmasıyla birlikte, ana malzemenin deformasyonu sonucunda ara yüzeyin dalga formunda oluştuğu saptanmıştır. Bu sonuçları destekleyen diğer bir çalışmada, Arık ve arkadaşları [18] in-situ yöntemini kullanarak üretmiş oldukları Al esaslı Al₄C₃ takviyeli MMK malzemelerin kaynağında birleştirme sıcaklığının, birleşme süresinden daha etkili olduğunu ortaya koymuşlardır. Mikroyapı görüntülerinde ara yüzeyin belirgin olmayışı sağlam ara yüzey bağlantısının göstergelerinden biri olduğunu belirtmişlerdir [18].

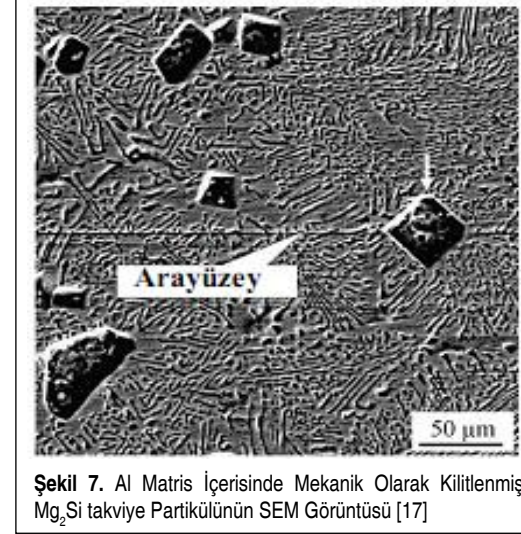


Şekil 5. Ara Yüzey Formunun Sıcaklığın Artmasıyla Birlikte Değişimi: (a) 540 °C; (b) 560 C; (c) 580 °C [17]



Şekil 6. SiC PTAMK Malzemede, Takviye Partiküllerin Ara Yüzeyde Dağılımını: a) Teorik Olarak Düzlemsel Temas Ara Yüzeyi; b) Takviye Partiküllerinin Temas Ara Yüzeyinde Matris Malzemesine Doğru Nüfuz Etmesiyle Birlikte Düzlemsel Olmayan Ara Yüzey Oluşumu [9]

Şekil 6'a'da [9] Al-MMK'de SiC_p takviye partiküllerinin düzlemsel ara yüzey oluşturduğu varsayılmıştır. Buna karşılık, takviye partiküllerinin matris malzemesine doğru nüfuz etmesiyle birlikte birleşme ara yüzeyinde mekanik olarak kilitlenmiş partiküller oluşur [9] (Şekil 6b). İkinci durumda SiC_p takviye partiküllerinin mekanik kilitleme etkisi ve her iki temas yüzeyinde oksit tabakasının bölgesel olarak kırılmasından dolayı ara yüzeyde birleşme dayanımı daha yüksek olacaktır [10].



Şekil 7. Al Matris İçerisinde Mekanik Olarak Kilitlenmiş Mg₂Si Takviye Partikülünün SEM Görüntüsü [17]

Şekil 7'de [17] Mg₂Si takviye partiküllerinin temas ara yüzeyinde alüminyum metal matrise doğru nüfuz ettiği görülmektedir. Ara yüzey temas bölgesinde mekanik olarak kilitlenmiş takviye partikülleri, temas ara yüzeyindeki kararlı oksit tabakasının süreksizleştirilip, kararsız bir hâl almasında etkilidir [17].

Katı hâl difüzyon kaynağı sonrasında ara yüzeyde üç tip mikro birleşme olmaktadır. Bunlar [12];

- Matris/Matris mikro birleşim
- Matris/Takviye mikro birleşim
- Takviye/Takviye mikro birleşim

Bu üç tip mikro birleşim türünden hangisinin daha baskın olacağı, MMK malzemenin içerdiği takviye miktarına ve takviye partiküllerinin dağılımına bağlı olmakla birlikte, matris/matris mikro birleşimi kesme dayanımı açısından oldukça iyi bir mikro birleşme durumudur [12]. Matris/takviye ve takviye/takviye mikro birleşme durumu, kesme dayanımı üzerinde matris/matris mikro birleşim durumuna göre kıyaslandığında olumsuz etkiye sahiptir [10,12, 17,19, 20]. Matris/matris mikro birleşim durumu ara yüzey kesme dayanımının artırılmasında oldukça etkilidir [12]. Zhang ve arkadaşları [20], SiC_p takviyeli alüminyum matrisli kompozitlerde takviye partikül hacim oranının artmasıyla birlikte ara yüzey kesme dayanımının azaldığını belirtmişlerdir. Takviye partikül hacim oranının

artmasıyla birlikte, matris/takviye ve takviye/takviye mikro birleşim durumunun oluşması neticesinde ara yüzeyde, zayıf mikro birleşim durumu artacaktır, dolayısıyla bu durum ara yüzey kesme dayanımı üzerinde olumsuz bir etki yaratacaktır [20].

Küçükçara ve arkadaşları [21], toz metalurjisi (T/M) yöntemiyle üretilen Al- SiC_p kompozitinin 6063 Al alaşımı ile difüzyon kaynak kabiliyetini incelemişlerdir. Farklı oranlarda SiC_p içeren Al- SiC_p kompoziti 6063 Al çiftinin difüzyon kaynağı 600 °C'de 3,5 saat ve 2 MPa basınç uygulanarak gerçekleştirilmiştir ve çalışma neticesinde SiC_p artışıyla kesme dayanımının azaldığını tespit etmişlerdir [21]. Çaligulu ve arkadaşları [22], SiC_p takviyeli Al esaslı MMK çiftinin difüzyon kaynağı yöntemiyle birleştirilmesinde, kaynak süresinin birleşme üzerindeki etkisini araştırmıştır. Çalışmada [22], difüzyon kaynağı özel olarak tasarlanmış difüzyon kaynak aparatında 600 °C'lik sabit sıcaklıkta, 20-40-60 dakikalık sürelerde ve 30 N yük uygulayarak argon atmosferinde gerçekleştirilmiştir. % 5 ve 10 (ağ.) SiC_p içerikli numunelerde 20 ve 40 dakikalarda yapılan birleştirmelere göre, 60 dakikada yapılan birleştirmelerde daha yüksek kayma dayanımı değerleri elde edilmiş, kesme dayanımı değerlerine göre, % 5-10 (ağ.) SiC_p içerikli numuneler için 600 °C'de yapılan birleştirmelerde 60 dakikalık sürenin daha uygun olduğu, % 20 (ağ.) SiC_p içerikli numunede ise 40 dakikalık sürenin daha uygun olduğunu saptamışlardır [22].

Temas yüzeylerinde bulunan oksit tabakası atomların difüzyonunu engeller ve dolayısıyla matris/matris mikro birleşimini zorlaştırır, matris malzemesine göre daha sert olan takviye partikülleri temas ara yüzeylerinde matris malzemesine doğru içeri girerler [17]. Takviye partiküllerinin, bu şekilde matris malzemesinin içine doğru nüfuz etmesi sonucunda, ara yüzeyde kesme dayanımını artmasını sağlayan kilitleme mekanizmasının yanı sıra oksit tabakasını bölgesel olarak ortadan kaldırarak matris/matris mikro birleşiminin oluşmasını sağlar [17].

Aydın ve arkadaşlarının [23], %3 SiC_p takviyeli Al-7075 matrisli kompozit çiftini katı hâl difüzyon kaynağı yöntemiyle vakum ortamında, 560 °C'de, 2 MPa basınç altında, 60-120 dakika süre birleştirdikleri çalışmada; takviye partiküllerinin matris malzemesine doğru nüfuz etmesinin ve oksit tabakasının süreksiz hâle gelmesinin ara yüzey kesme dayanımını artırdığı belirtilmiştir. Ayrıca en iyi kesme dayanımı iki saatlik birleştirme süresiyle elde edilmiştir [23].

Liming ve arkadaşları [12], alüminyum esaslı MMK malzemelerin difüzyon kaynağında en iyi kesme dayanımının elde edilebileceği sıcaklık aralığının, katı-sıvı faz çizgisinin arasında olduğunu ortaya koymuşlardır. Difüzyon kaynak sıcaklığı, bu sıcaklık aralığına ulaştığında eriyen matris takviye/takviye mikro birleşme oluşumu arasına nüfuz eder, böyle-

likle takviye/matris/takviye mikro birleşimi meydana gelir [12]. Solidus ve likudus eğrilerinin arasında optimum bir sıcaklıkta, bağlantının dayanımı açısından en iyi sonuç, zayıf mikro birleşme oluşumlarının dayanımlarının artırılmasıyla mümkün olmakla birlikte; takviye partiküllerinin eriyen matris tarafından ısıtılması sonucu matris/takviye partikülü ara yüzey oluşumu daha sağlam bir yapı oluşturur ve takviye/takviye ara yüzey oluşumları, takviye/matris/takviye ara yüzey oluşumları olarak meydana gelir [12].

3. GEÇİCİ SIVI FAZ DİFÜZYON KAYNAĞI

Bu yöntemde, birleşme ara yüzeyinde yüzeyleri ısıtabilecek ince bir sıvı filmi oluşturulması ve bu sıvı filmin izotermal olarak katılaşması söz konusudur [25]. Solidus ve likudus eğrilerinin arasında optimum bir sıcaklıkta, bağlantının dayanımı açısından en iyi sonuç zayıf mikro birleşme oluşumlarının dayanımlarının artırılmasıyla mümkündür. Takviye partiküllerinin eriyen matris tarafından ısıtılması sonucu matris/takviye ara yüzey oluşumu daha sağlam bir yapı oluşturur ve takviye/takviye ara yüzey oluşumları, takviye/matris/takviye ara yüzey oluşumları olarak meydana gelir [12]. Buna karşılık, Shirzadi ve arkadaşları [10], oluşan sıvı faz hacminin %3'ü geçmesi halinde; tane sınırlarında çatlak oluşumunun meydana geldiğini ve birleşme ara yüzeyinde porozite oluşumunun arttığını belirtmiştir.

Zhang ve arkadaşları [20], SiC_p takviyeli alüminyum matrisli kompozitlerde katı hâl ve geçici sıvı hâl difüzyon kaynağının birleşmenin kesme dayanımı üzerindeki etkisini karşılaştırmışlardır. Söz konusu çalışmada [20] geçici sıvı faz difüzyon kaynağıyla yapılan birleştirmeler, takviye partikül miktarı artsa dahi kesme dayanımı açısından olumlu sonuç vermiştir. Al-Si-Mg aktif sert lehim alaşımının ara tabaka olarak kullanılması sonucunda, Mg elementinin kimyasal olarak ara yüzeyde bulunan oksit tabakasıyla etkileşime girdiği ve dolayısıyla birleşme ara yüzeyinde, SiC_p/SiC_p ve SiC_p/Al ara yüzeylerinde oluşabilecek zayıf mikro birleşme durumunu azalttığı belirtilmiştir [20].

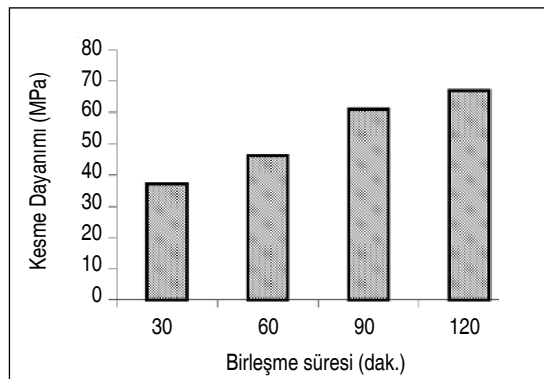
Urena ve arkadaşları [26], SiC_p/2124Al MMK malzemenin sıvı faz difüzyon kaynağı işleminde ara tabaka olarak Al-Li alaşımı ve Al-Cu alaşımı kullanmışlardır, lityum içeren ara tabaka folyosuyla yapılan kaynak işlemi neticesi daha iyi kesme dayanımı sonuçları elde edilmiştir. Kesme dayanımındaki yükselişin sebebi oksit tabakası ile Li'nin reaksiyona girmesi sonucu süreklilik oksit tabakasının süreksizleşmesi, birleşme ara yüzeyinde Li₂O, LiAlO₂, LiAl₅O₈ gibi süreksiz, daha az sertliğe sahip oksitlerin oluşmasıdır [26]. Urena ve arkadaşları [27] diğer çalışmalarında, SiC_p/2014Al MMK malzemenin sıvı faz difüzyon kaynağı işleminde, ara tabaka olarak Al-Li alaşımı ve saf gümüş kullanmışlardır. Söz konusu çalışmada

[27] lityum içeren ara tabaka folyosuyla yapılan kaynak işlemi neticesi daha iyi kesme dayanımı sonuçları elde edilmiştir. Saf gümüşün, birleşme ara yüzeyinde sürekli intermetalik tabaka oluşumunu engellemek için bir önceki çalışmaya [28] göre gümüş folyo kalınlığı 3 µm olarak belirlenmiştir [27]. Buna rağmen birleşme ara yüzeyinde oluşan iğnemi intermetalik oluşumları, kesme dayanımı açısından tatmin edici sonuçlar vermemiştir [27]. Maity ve arkadaşları [29], 50 µm kalınlığında bakır folyo kullanarak gerçekleştirdikleri sıvı faz difüzyon kaynağı işleminde, daha önce literatürde yer almayan uzun zamanlı (6 saat) birleştirmenin kesme dayanımı üzerinde olumlu etkileri olduğunu saptamışlardır.

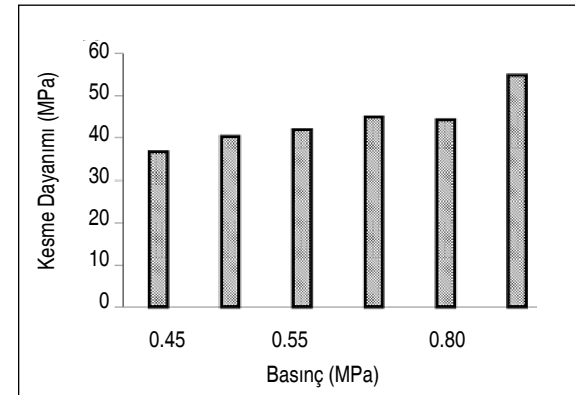
Diğer taraftan, matris malzemesinin difüzyon kaynağı sonrası elde edilen kesme dayanımı değerinin %92 oranındaki kesme dayanımı değeri, Shirzadi ve Wallach [24] tarafından Al-MMK malzeme için sıvı faz difüzyon kaynağı ile 560 °C, 0.1-0.2 MPa basınçta, 7 µm kalınlığında bakır ara tabaka kullanılarak, 20 dakikalık birleştirme işlemi sonrası izostatik preslemeyle sağlanmıştır.

Bakır ara tabaka kullanıldığında birleşme bölgesinde SiC_p'in segregasyonu sonucu dayanım değerinde düşüş meydana gelir [30-33]. Ancak, Askew ve arkadaşları [34] nikel ara tabaka kullanıldığında böyle bir durumun meydana gelmediğini, nikel ara tabaka kullanıldığında birleşme sıcaklığının 650 °C civarında olduğunu, bu sıcaklığın alüminyumun ergime sıcaklığına çok yakın olduğunu ve dolayısıyla makro boyutta bir deformasyonun kaçınılmaz olduğunu bildirmişlerdir. Dolayısıyla Yan ve arkadaşları [35], daha düşük sıcaklıklarda birleşme yapılabilmesi için Cu-Ni-Cu ara tabaka kullanımının işlevselliğini araştırmışlardır. Al₂O₃/p/6061 Al MMK malzemenin kullanıldığı çalışmada [35], hacimsel olarak %30 takviye partikülü (0.4 µm) kullanılmıştır. Sıvı faz difüzyon kaynağı 580 °C'de 30-90 dakika aralığında ve vakum altında gerçekleştirilmiştir [35].

Kumar [36], ortalama olarak 23µm çapında SiC_p kullandığı



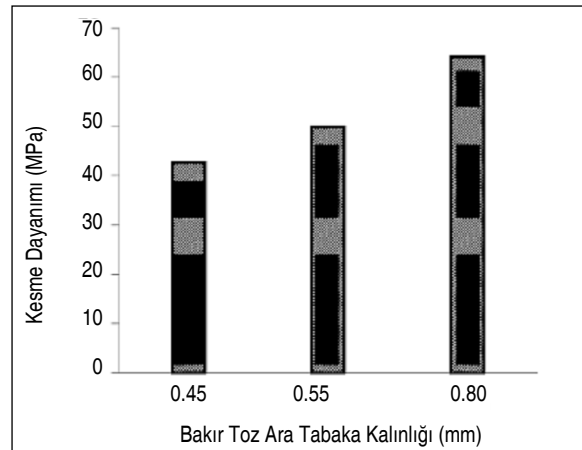
Şekil 8. Geçici Sıvı Faz Difüzyon Kaynağı Yöntemi ile Bakır Folyo Kullanılarak Birleştirilmiş Al-SiC_p MMK Malzemenin Birleşme Süresine Bağlı Kesme Dayanımı Değerleri (basınç 2 MPa) [36]



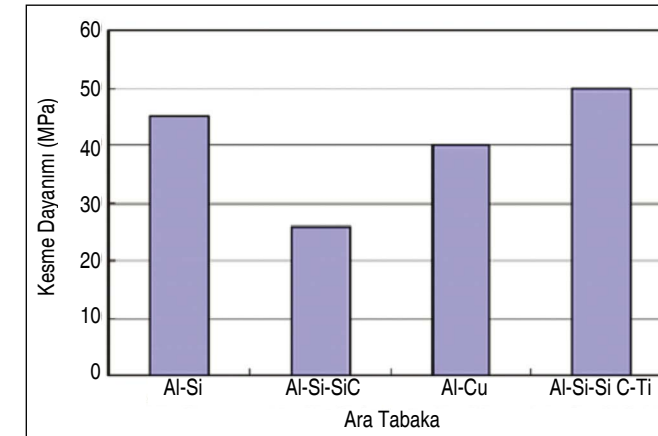
Şekil 9. Geçici Sıvı Faz Difüzyon Kaynağı Yöntemi ile Bakır Folyo Kullanılarak Birleştirilmiş Al-SiC_p MMK Malzemenin Basınç Değeri-Ne Bağlı Kesme Dayanımı Değerleri (süre 30 dak.) [36]

çalışmasında matris malzemesi olarak Al-6061 kullanmıştır. Çalışmada [36] hacimsel olarak %15 SiC_p, ara tabaka olarak bakır folyo ve bakır tozları kullanılmış, sıvı faz difüzyon kaynağı argon atmosferinde, 560 °C'de, 2-3 MPa basınç altında, 30-60-90-120 dakika yapılmıştır. Çalışma [36] sonunda artan süre ve basınç ile kayma dayanımlarının arttığı saptanmıştır (Şekil 8, Şekil 9). Ayrıca ara tabaka olarak bakır tozları kullanıldığında, uygulanan ara tabakanın kalınlığının artmasıyla birlikte kayma dayanımlarının arttığı tespit edilmiştir (Şekil 10) [36].

Huang ve arkadaşları [37], hacimsel olarak %15 SiC_p ihtiva eden alüminyum esaslı (Al6063) MMK malzemenin difüzyon kaynağında ara tabaka olarak kullanılan metal tozlarının, birleştirmenin kayma dayanımı üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Ara tabakada titanyum kullanımının birleştirmenin kesme dayanımının artırılmasına olumlu yönde etki ettiği, Al-Si ve Al-Cu tozlarının ara tabaka olarak kullanıldığı bir-



Şekil 10. Geçici Sıvı Faz Difüzyon Kaynağı Yöntemi ile Bakır Toz Kullanılarak Birleştirilmiş Al-SiC_p MMK Malzemenin Ara Tabaka Kalınlığına Bağlı Olarak Kesme Dayanımı Değerleri (süre 20 dak., basınç 2 MPa) [36]



Şekil 11. SiC_p /6063 MMK Malzemenin Al-Si, Al-Cu, Al-Si-SiC ve Al-Si-SiC-Ti Tozlarının Ara Tabaka Olarak Kullanılmasıyla Elde Edilen Kesme Dayanımı Değerleri (sıcaklık 595 °C, süre 90 dak.) [37]

leştirmelerde elde edilen kayma dayanımının Al-Si-SiC tozlarının ara tabaka olarak kullanıldığı birleştirmelerden daha iyi sonuç verdiği saptanmıştır (Şekil 11) [37]. Şekil 11'de [37] SiC_p/6063 MMK malzemenin Al-Si, Al-Cu, Al-Si-SiC ve Al-Si-SiC-Ti tozlarının ara tabaka olarak kullanılmasıyla elde edilen kesme dayanımı değerleri incelendiğinde, Al-Si-SiC ara tabakasına titanyum eklendiğinde, kesme dayanımının en düşük değerden en yüksek değere yükseldiği görülmektedir. Titanyum tozunun SiC_p segregasyonunu azalttığı, SiC_p ıslatılabilirliğini artırdığı belirtilmiştir [37].

4. SONUÇLAR

PTAMK malzemelerin difüzyon kaynağı işleminde gevrek ve sürekli karakterde olan oksit tabakası birleşme ara yüzeyinde difüzyonun meydana gelebilmesi için engel teşkil eder. Bu bağlamda, difüzyon kaynak kabiliyetini olumsuz yönde etkileyen yüzeyde oluşan kararlı oksit tabakalarının ortadan kaldırılması ve süresiz hâle getirilmesi oldukça önemlidir.

Birleştirme yüzeylerinde etkili bir difüzyon sürecinin meydana gelmesi, gevrek oksit tabakasının basınç etkisiyle karasızlaştırılması etkili bir işlemdir. Basınç (MPa) değeri belirlenirken birleştirilecek parçaların makro düzeyde deformasyonundan kaçınılmalıdır.

PTAMK malzemelerin sıvı hâl difüzyon kaynağı işleminde, lityum ve magnezyum elementleri, kararlı oksit tabakalarının ortadan kaldırılması ve süresiz hale getirilmesinde oldukça etkilidir.

Ara yüzeyde mekanik olarak kilitlenmiş partiküller temas yüzeylerinde bulunan oksit tabakasının süresizleşmesinde etkili olmakla birlikte takviye partikül miktarının artmasıyla birlikte matris/takviye ve takviye/takviye mikro birleşim durumunun oluşma olasılığının artmasından dolayı ara yüzeyde zayıf mikro birleşim durumu artar.

PTAMK malzemelerin difüzyon kaynağı işleminde ara tabaka olarak toz formlar kullanılabilir. KAYNAKÇA

1. Soy, U. 2009. "Metal Matris Kompozit Malzemeler," SAÜ Teknoloji Fakültesi.
2. Torralba, J. M., da Costa, C. E., Velasco, F. 2003. "P/M Aluminum Matrix Composites: An Overview," Journal of Materials Processing Technology, vol. 133, no. 1-2, p.203-206.
3. Chawla, N., Chawla, K.K. 2006. "Metal Matrix Composites," Springer, Newyork.
4. Gurler, R. 1998. "Fusion Welding of SiC Particulate-Reinforced Aluminum 392 Metal Matrix Composite," Journal of Materials Science Letters, vol.17, no.18, p.1543-1544.
5. Wang, X.H., Niu, J.T., Guan, S.K., Wang, L.J., Cheng, D.F. 2009. "Investigation on TIG Welding of SiCp-Reinforced Aluminum-Matrix Composite Using Mixed Shielding gas and Al-Si Filler," Materials Science and Engineering a-Structural Materials Properties Microstructure and Processing, vol.499, no.1-2, p.106-110.
6. Shirzadi, A.A., Wallach, E.R. 1997. "New Approaches For Transient Liquid Phase Diffusion Bonding of Aluminium Based Metal Matrix Composites," Materials Science and Technology, vol.13, no.2, p.135-142.
7. Bushby, R.S., Scott, V.D. 1995. "Liquid Phase Bonding of Aluminium and Aluminium/Nicalon Composite Using Interlayers of Cu-Ag Alloy," Mater. Sci. Technol., vol.11, no.7, p.643-649.
8. Devletian, J.H. 1987. "SiC/Al Metal Matrix Composite Welding by a Capacitor Discharge Process," Welding Journal, vol.66, no.6, p.33-39.
9. Shirzadi, A.A. 1998. PhD Thesis, University of Cambridge, Cambridge.
10. Shirzadi, A.A., Assadi, H., Wallach, E.R. 2001. "Interface Evolution and Bond Strength When Diffusion Bonding Materials with Stable Oxide Films," Surface and Interface Analysis, vol.31, no.7, p.609-618.
11. Lee, C.S., Li, H., Chandel, R.S. 1999. "Stimulation Model For the Vacuum-Free Diffusion Bonding of Aluminium Metal-Matrix Composite," Journal of Materials Processing Technology, vol.90, p.344-349.
12. Liu, L.M., Zhu, M.L., Pan, L.X., Wu, L. 2001. "Studying of Micro-Bonding in Diffusion Welding Joint for Composites," Materials Science and Engineering a-Structural Materials Properties Microstructure and Processing, vol.315, no.1-2, p.103-107.

13. **Nami, H., Halvae, A., Adgi, H., Hadian, A.** 2010. "Investigation on Microstructure and Mechanical Properties of Diffusion Bonded Al/Mg2Si Metal Matrix Composite Using Copper Interlayer," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 210, no.10, p.1282-1289.
14. **Aydın, M.** "TR2002 02710 U Patented Diffusion Bonding Machine," Department of Machine Engineering, Faculty of Engineering, University of Dumlupınar, Kutahya, Turkey.
15. **Ricks, R.A., Mahon, G.J., Parson, N.C., Heinrich, T., Winkler, P.J.** 1990. "Development of Diffusion Bonding Techniques for Al-Li Base Alloy AA 8090", *Proc. Conf. Diffusion Bonding 2*, Cranfield Institute of Technology, Cranfield, UK, 69-82, ed. Stephenson D.J, Amsterdam, Elsevier.
16. **Nicholas, N.H., Nichting, R.A., Edwards, G.R., Olson, D.L.** 1990. "The Influence of Surface Topography on Low Temperature Solid State Bonding," *Proc. Conf. Recent Trends in Welding Science & Technology*, 547-550, ed. David S.A. and Vitek V.M., ASM International.
17. **Nami, H., Halvae, A., Adgi, H., Hadian, A.** 2010. "Microstructure and Mechanical Properties of Diffusion Bonded Al/Mg2Si Metal Matrix in Situ Composite," *Materials & Design*, vol.31, no.8, p.3908-3914.
18. **Arik, H., Aydın, M., Kurt, A., Turker, M.** 2005. "Weldability of Al4C3-Al Composites Via Diffusion Welding Technique," *Materials & Design*, vol.26, no.6, p.555-560.
19. **Muratoglu, M., Yilmaz, O., Aksoy, A.** 2006. "Investigation on Diffusion Bonding Characteristics of Aluminum Metal Matrix Composites (Al/SiCp) with Pure Aluminum for Different Heat Treatments," *Journal of Materials Processing Technology*, vol.178, no.1-3, p.211-217.
20. **Zhang, X.P., Ye, L., Mai, Y.W., Quan, G.F., Wei, W.** 1999. "Investigation on Diffusion Bonding Characteristics of SiC Particulate Reinforced Aluminium Metal Matrix Composites (Al/SiCp-MMC)," *Composites Part a-Applied Science and Manufacturing*, vol.30, no.12, p.1415-1421.
21. **Küçükara, H., Acarer, M., Ahlatcı, H., Türen, Y.** 2009. "Toz Metalurjisi Yöntemiyle Üretilen Al-SiCp Kompozitlerin Difüzyon Kaynak Kabiliyetlerinin İncelenmesi," 5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu 13-15 Mayıs, Karabük, Türkiye.
22. **Çalgülü, U., Dikbaş, H., Taşkın, M.** 2006. "Sıcak Presleme Yöntemiyle İmal Edilmiş SiCp Takviyeli Alüminyum Esaslı Kompozitlerin Difüzyon Kaynağında Sürenin Birleşme Üzerindeki Etkisinin İncelenmesi," *Fırat Üniv. Fen ve Müh. Bil. Dergisi*, cilt18, sayı3, s.437-443.
23. **Aydın, M., Gurler, R., Turker, M.** 2009. "The Diffusion Welding of 7075Al-3%SiC Particles Reinforced Composites," *Physics of Metals and Metallography*, vol.107, no.2, p.206-210.
24. **Shirzadi, A. A., Wallach, E. R.** 1997. "Temperature Gradient Transient Liquid Phase Diffusion Bonding: A New Method for Joining Advanced Materials," *Science and Technology of Welding and Joining*, vol.2, no.3, p.89-94.
25. **Taşkın, M., Kejanlı, H., Firat, E.H., Çalgülü, U.** 2008. "T/M Yöntemiyle Üretilmiş Ni-Ti-Cu Alaşımlarının TLP Difüzyon Kaynağında Ni Ve Cu Folyo Arasındaki Mikrosertlik Değerlerinin İstatistiki Olarak İncelenmesi," *Fırat Üniv. Fen ve Müh. Bil. Dergisi*, cilt20, sayı2, s.379-388.
26. **Urena, A., Desalazar, J.M.G.** 1993. "Bonding of Aluminum-Matrix Composites for Application in the Transport Industry," *Journal De Physique Iv*, vol.3, no.C7, p.1037-1042.
27. **Urena, A., deSalazar, J.M.G., Escalera, M.D.** 1996. "Diffusion Bonding of an Aluminium-Copper Alloy Reinforced with Silicon Carbide Particles (AA2014/SiC/13p) Using Metallic Interlayers," *Scripta Materialia*, vol.35, no.11, p.1285-1293.
28. **Urena, A., Gomez de Salazar, J.M., Escalera, M.D.** 1995. "Metal Matrix Composites. Part 2: Microstructural Characterization, Thermomechanical Behavior and Modeling," (Ed. G.M. Newaz, et al.) *Trans Tech Publications*, Zurich, p. 523.
29. **Maity, J., Pal, T.K., Maiti, R.** 2009. "Transient Liquid Phase Diffusion Bonding of 6061-15 Wt% SiCp in Argon Environment," *Journal of Materials Processing Technology*, vol.209, no.7, p.3568-3580.
30. **Li, Z., Fearis, W., North, T.H.** 1995. "Particulate Segregation and Mechanical-Properties in Transient Liquid-Phase Bonded Metal-Matrix Composite-Material," *Materials Science and Technology*, vol.11, no.4, p.363-369.
31. **Li, Z., Zhou, Y., North, T.H.** 1995. "Counteraction of Particulate Segregation During Transient Liquid-Phase Bonding of Aluminum-Based MMC Material," *Journal of Materials Science*, vol.30, no.4, p.1075-1082.
32. **Zhai, Y., North, T.H., SerratoRodrigues, J.** 1997. "Transient Liquid-Phase Bonding of Alumina and Metal Matrix Composite Base Materials," *Journal of Materials Science*, vol.32, no.6, p.1393-1397.
33. **Macdonald, W.D., Eagar, T.W.** 1992. "Transient Liquid-Phase Bonding," *Annual Review of Materials Science*, vol.22, p.23-46.
34. **Askew, J.R., Wilde, J.F., Khan, T.I.** 1998. "Transient Liquid Phase Bonding of 2124 Aluminium Metal Matrix Composite," *Materials Science and Technology*, vol.14, no.1-2, p.920-924.
35. **Yan, J.C., Xu, Z.W., Wu, G.H., Yang, S.Q.** 2004. "Interface Structure and Mechanical Performance of TLP Bonded Joints of Al2O3p/6061Al Composites Using Cu/Ni Composite Interlayers," *Scripta Materialia*, vol.51, no.2, p.147-150.
36. **Pal, T.K.** 2005. "Joining of Aluminium Metal Matrix Composites," *Materials and Manufacturing Processes*, vol.20, no.4, p.717-726.
37. **Huang, J.H., Dong, Y.L., Wan, Y., Zhao, X.K., Zhang, H.** 2007. "Investigation on Reactive Diffusion Bonding of SiCp/6063 MMC by Using Mixed Powders as Interlayers," *Journal of Materials Processing Technology*, vol.190, no.1-3, p.312-316.
38. **Feng, T., Chen, X.Z., Wu, L.H., Lou, S.N.** 2006. "Diffusion Welding of SiCp/2014Al Composites Using Ni as Interlayer," *Journal of University of Science and Technology Beijing*, vol.13, no.3, p.267-271.
39. **Guo, W., Hua, M., Law, H.W., Ho, J.K.L.** 2008. "Liquid-Phase Impact Diffusion Welding of SiCp/6061Al and its Mechanism," *Materials Science and Engineering a-Structural Materials Properties Microstructure and Processing*, vol.490, no.1-2, p.427-437.
40. **Huang, J.H., Wan, Y., Zhang, H., Zhao, X.K.** 2007. "TLP Bonding of SiCp/2618Al Composites Using Mixed Al-Ag-Cu System Powders as Interlayers," *Journal of Materials Science*, Vol.42, No.23, p.9746-9749.
41. **Huang, J.H., Wan, Y., Zhao, H.T., Cheng, D.H., Zhang, H.** 2007. "Effect of Ti on TLP Bonding of SiCp/2618Al Composites Using Interlayers of Mixed Al-Ag-Cu System Powders," *Materials Science and Technology*, vol.23, no.1, p.87-91.
42. **Maity, J., Pal, T.K., Maiti, R.** 2008. "Microstructural Characterization of TLPD Bonded 6061-SiCp Composite," *Journal of Materials Engineering and Performance*, vol.17, no.5, p.746-754.
43. **Maity, J., Pal, T.K., Maiti, R.** 2010. "Transient Liquid Phase Diffusion Bonding of 6061-13 Vol.% SiCp Composite Using Cu Powder Interlayer: mechanism and interface characterization," *Journal of Materials Science*, vol.45, no.13, p.3575-3587.
44. **Bozkurt, Y., Uzun, H., Salman, S.** 2011. "Effect of Tool Wear on Mechanical Properties of Friction Stir Welded AA2124/SiCp/25 Composite Plates," *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, vol.26, no.1, p.139-149.
45. **Ceschini, L., Boromei, I., Gambaro, C., Minak, G., Morri, A., Tarterini, F.** 2010. "Friction Stir Welding of Aluminium Based Composites Reinforced with Al(2)O(3) Particles," In: Chandra T, Wanderka N, Reimers W, Ionescu M, editors. *Thermec 2009*, Pts 1-4, vol. 638-642, p.87-92.
46. **Ceschini, L., Boromei, I., Minak, G., Morri, A., Tarterini, F.** 2007. "Microstructure, Tensile And Fatigue Properties of AA6061/20 vol.%Al2O3p Friction Stir Welded Joints," *Composites Part a-Applied Science and Manufacturing*, vol.38, no.4, p.1200-1210.
47. **Ceschini, L., Boromei, I., Minak, G., Morri, A., Tarterini, F.** 2007. "Effect of Friction Stir Welding on Microstructure, Tensile And Fatigue Properties of the AA7005/10 Vol.%Al2O3p Composite," *Composites Science and Technology*, vol.67, no.3-4, p.605-615.
48. **Chen, X.G., da Silva, M., Gougeon, P., St-Georges, L.** 2009. "Microstructure and Mechanical Properties of Friction Stir Welded AA6063-B(4)C Metal Matrix Composites," *Materials Science and Engineering a-Structural Materials Properties Microstructure and Processing*, vol.518, no.1-2, p.174-184.
49. **Feng, A.H., Xiao, B.L., Ma, Z.Y.** 2008. "Effect of Microstructural Evolution on Mechanical Properties of Friction Stir Welded AA2009/SiCp Composite," *Composites Science and Technology*, vol.68, no.9, p.2141-2148.
50. **Fuch, U., Zimmermann, K., Sauer, H.W., Trautmann, K.H., Biallas, G.** 2008. "Similar and Dissimilar Friction Stir Welded Joints Made from AA2124+25% SiC and AA2024," *Materialwissenschaft Und Werkstofftechnik*, vol.39, no.8, p.531-544.
51. **Mahmoud, E.R.I., Takahashi, M., Shibayanagi, T., Ikeuchi, K.** 2009. "Effect of Friction Stir Processing Tool Probe on Fabrication of SiC Particle Reinforced Composite on Aluminium Surface," *Science and Technology of Welding and Joining*, vol.14, no.5, p.413-425.
52. **Minak, G., Ceschini, L., Boromei, I., Ponte, M.** 2010. "Fatigue Properties of Friction Stir Welded Particulate Reinforced Aluminium Matrix Composites," *International Journal of Fatigue*, vol.32, no.1, p.218-226.
53. **Nami, H., Adgi, H., Sharifitabar, M., Shamabadi, H.** 2011. "Microstructure and Mechanical Properties of Friction Stir Welded Al/Mg(2)Si Metal Matrix Cast Composite," *Materials & Design*, vol.32, no.2, p.976-983.
54. **Tajdari, M., Mehraban, A. G., Khoogar, A. R.** 2010. "Shear Strength Prediction of Ni - Ti alloys Manufactured by Powder Metallurgy Using Fuzzy Rule-Based Model," *Materials and Design*, vol.31, no.3, p.1180-1185.
55. **Maddrell, E.R., Ricks, R.A., Wallach, E.R.** 1989. "Diffusion Bonding of Aluminium Alloys Containing Lithium and Magnesium," *Proc. Conf. Aluminium-Lithium 5*, Williamsburg, Virginia, USA, 451-460, ed. Sanders Jnr. T.H. and Starke Jnr. E.A., MCEP Ltd. Birmingham, UK.