



Ticari ve Askerî Elektronik Cihazlarda Kullanılan Yüzeye Montajlı Yeni Nesil Devre Elemanlarının Tamir Sürecindeki Etkili Faktörler

Necdet GEREN* ve Murat ÇAKIRCA**

Öz

Son yıllarda elektrikli araçlar, insansız hava araçları, haberleşme uydusu gibi uzay ve havacılık sistemlerinin millî kaynaklar ile geliştirilme çalışmaları artmıştır. Bu nedenle de savunma sanayi ürünlerinin imalat teknolojilerine giderek artan ölçüde ihtiyaç duyulmaktadır. Baskı devre kartı (BDK) tamirini sağlayan tekrar üretim (remanufacturing) olarak da adlandırılan tamir teknolojisi de bu teknolojilerden biridir. BDK tamiri, üretim esnasında veya kullanım sırasında hatası veya arızası tespit edilen elektronik ekipmanın genel performansını ve güvenilirliğini olumsuz yönde etkilemeden hataya neden olan elektronik elemanın ekonomik bir şekilde yenisi ile değiştirilmesini hedefler. Tamirin sağlıklı bir şekilde yapılması, ürünün yaşam döngüsü içindeki güvenilirliğini doğrudan etkiler. Tamir sürecindeki eksik ve hatalı uygulamalar kullanım sırasında arızalara neden olur. Bu da hayati tehlike veya istenmeyen sonuçlar yaratabilir. Elektronik tamir, elektronik üretimin özel ihtisas konusu olarak literatürde yerini almıştır. Ancak konu ile ilgili ulusal bilgi birikimi yetersizdir.

Bu çalışmanın amacı montajlı kart (MK) üzerinde yer alan ızgara dizinimli dâhil yeni nesil yüzeye monte (YM) elektronik devre elemanı (EDE) tamir sürecini, sürecin önemli evrelerini ve süreçteki etkili faktörleri ortaya koymaktır. Çalışmanın içeriği elektronik sistemlerde YM EDE teknoloji kullanan savunma sanayi kuruluşlarının MK tamir süreçlerinin yapılandırılmasına katkı sağlayacaktır. Ayrıca, çalışmanın

* Prof. Dr. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü, gerendr@cu.edu.tr ORCID: 0000-0002-9645-0852.

**Yapısal Testler Kısım Yöneticisi, Tofaş Türk Otomobil Fabrikası, murat.cakirca@tofas.com.tr, ORCID: 0000-0002-7933-3320

çıktıları otonom MK tamir sistemlerinin geliştirilebilmesi için gerekli olan temel girdiler olup ürün-makine ilişkisi kurulmasında kullanılabilir.

Anahtar Kelimeler: *Savunma Teknolojileri, Elektronik Devre Elemanları Tamiri, Yüze Montajlı Yeni Nesil Elektronik Devre Elemanları, Baskı Devre Kartı Tamiri, İzgara Dizinimli (BGA, CSP) Devre Elemanları.*

Factors Effecting Rework of New Generation Surface Mount Components Used in Commercial and Military Electronic Devices

Abstract

In recent years, there has been an increasing amount of efforts to develop space and aviation systems such as electric vehicles, unmanned aerial vehicles, communication satellites through national resources in Turkey. Therefore, an increasing need for manufacturing technologies of defence products has emerged. Printed circuit board assembly (PCBA) and PCBA-rework or “remanufacturing” is one of these technologies. PCBA rework technology aims to replace a defected component economically in electronic equipment without adversely affecting the overall performance, function and reliability of PCBAs. Successful rework plays a major role for product reliability and durability. Incomplete and faulty applications during the repair process may completely disable the products, causing the loss of national resources. In the case of defence products, it can create life-threatening consequences.

Electronic repair is part of electronic production. However, the literature searches reveal that national knowledge on the subject is insufficient. This study reveals the new generation surface mount (SM) electronic component (EC) repair process and the important stages of this process. The content of the study will contribute to the structuring of PCB repair processes of companies using SM technology package. In addition, the fundamental knowledge required to establish the product-machine relationship for a development of autonomous PCB repair systems is provided to the national industry.

Keywords: *Defence Technologies, Electronic Component Repair, New Generation Surface Mounted Electronic Component Repair, Printed Circuit Board Rework, Area Array Components.*

Giriş

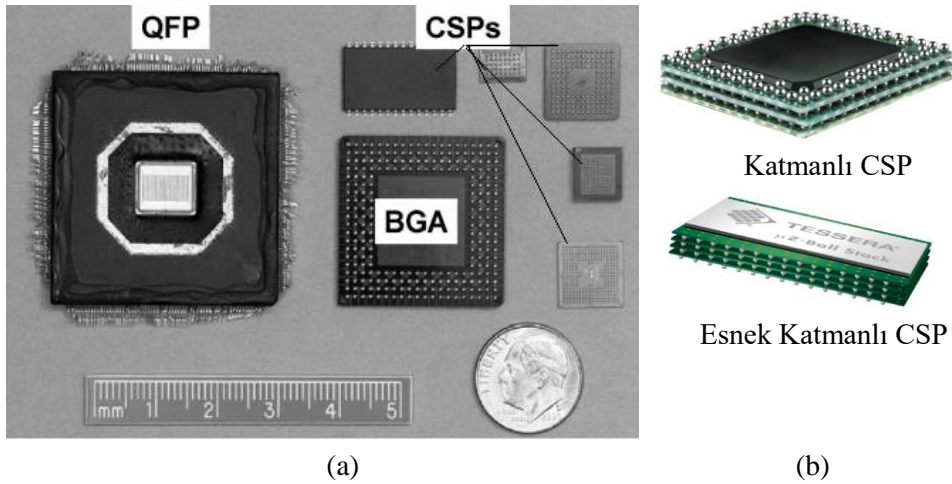
Dördüncü sanayi devrimine girdiğimiz süreçte ticari ve savunma sanayi ürünlerinin birçoğu mekanik sistemlerin kontrolünü veya çeşitli ölçüm sistemlerini elektronik teknolojiler ile gerçekleştirmektedir. Elektronik sistemlerin veri işleme hızını arttırmak için daha küçük hacimde daha çok yonga içeren yüzeye montajlı (surface mount) elektronik elemanları ve üretim teknolojisi kullanılmaktadır. Bu teknoloji aynı zamanda sağladığı ağırlık azaltma avantajı ile mobil sistemler, teçhizat ve taşıtlarda giderek artan bir kullanım alanı bulmuştur. Ticari ve savunma sanayi dijital unsurları veya sistemleri de bu değişimden etkilenmektedir. Bilindiği gibi dijital sistemler elektronik kartlar ve bu kartlara yüklü yazılımlardan oluşmaktadır. Dijital sistemlerin temel bileşenlerinden birisi baskı devre kartı (BDK) dir. Çeşitli tip ve yapıda ticari elektronik devre elemanları (EDE), BDK üzerine lehimlenerek montajlanır. Bu devre elemanlarının her biri 2 ila 300 veya daha fazla lehim bağlantı noktası (terminali) içerebilmektedir. Üzerinde onlarca EDE ve yüzlerce lehim bağlantısı bulunan montajlı BDK (MBDK) en zor çevre koşulları altında problemsiz çalışabilecek şekilde geliştirilmektedir. MBDK veya kısaca montajlı kart (MK), çalışma şartları altında yapısal rezonanslar, arazi koşulları, taşıt motorları, mühimmat atımı, platformların motorları vb. nedenlerden kaynaklı yüksek titreşime ve çalışma sıcaklığı kaynaklı termal gerilmelere maruz kalmaktadırlar. Ayrıca operasyon koşullarında ortaya çıkan dinamik yükler, EDE terminal/bacaklarında yüksek genlikli dinamik gerilmeler oluşturmakta ve yorulma hasarına da neden olmaktadır.

Titreşim ve dinamik yüklerin oluşturduğu yorulma hasarını önlemek için MK'ya çeşitli titreşim yalıtım prensipleri uygulanmaktadır. Titreşim yalıtımı genellikle yüksek sönümlenmeli izolatörler kullanılarak yapılır. Bu yöntemin 7-10 yıl olan hazır ticari ürün/kart kullanım ömürlerini 20 yıla kadar çıkarabildiği belirtilmektedir (Çelik ve Genç, 2010).

MK'nın enerji girdisi ve çevresel etmenler nedeniyle maruz kaldığı sıcak ve soğuk termal döngünün ortaya çıkardığı termal gerilmeler ise ek soğutucu elemanlar/sistemler eklenerek azaltılmaya çalışılmaktadır (Demircan ve Özdemir, 2019).

Savunma ve harp amaçlı askeri elektronik cihazlarda kullanılan ticari BDK'da paket tipi olarak delik-içi (Through-Hole (TH)) EDE kullanımı uzun yıllardır sürdürülmektedir. Bununla birlikte paket tipi olarak yüzeye monte (surface mount

devices) devre elemanlarının uzay uçuşu dahil askeri amaçlar için kullanımı NASA Elektronik Parça ve Paketler birimi (NEPP- NASA Electronic Parts and Packaging) tarafından onaylanmış ve Institute of Printed Circuits (IPC) 9701 (Performance Test Methods and Qualification Requirements for surface Mount Solder Attachments, IPC 9701), IPC-“Association Connecting Electronic Industries” tarafından 2002 yılında standartlaştırılmış ve basılmıştır (Ghaffarian, 2003). 2002 yılından itibaren elektronik endüstrisine getirdiği avantajlarından dolayı EDE üretiminde yeni paket tipleri de piyasaya sunulmuştur. Bu nedenle de dört taraflı yassı paket (Quad Flat Pack-QFP) gibi terminalli paket tipleri yerine ızgara dizimli (Grid Array veya Area Array Packaging) devre eleman paketleri kullanımına geçilmiştir (Şekil 1). Bu grupta yer alan en önemli paket tipleri bilye lehim toplu (Ball Grid Arrays (BGAs)) ve yonga tabakalı eleman (Chip Scale Packages-(CSPs)) paketleridir. CSP paketleri lehim terminal aralığı (adım) 1,27 mm olan BGA’ların daha da ince adımlı (0,8-0,4 mm) tipleridir. Bu paketler düşük kütle, küçük boyutlar ve 300’den fazla veri giriş/çıkış (I/O) seçeneği sunarlar. Ayrıca konvansiyonel yüzeye monte (YM) devre elemanlarına kıyasla gelişmiş elektriksel ve termal performans, daha efektif imalat (lehimleme esnasında terminal üzerinde merkezlenebilme, konvansiyonel üretime uygunluk vb.) ve montaj kolaylığı sağlarlar (Suhir vd., 2007). Ayrıca Şekil 1.(b)’de verildiği gibi katmanlı CSP’ler taşınabilir elektronik endüstrisinde ve mobil teçhizatı sıklıkla kullanılmaktadır.



Şekil 1. (a) YM EDE’de Minyatürleşme, QFP’den BGA’ya ve CSP’ye Geçiş Trendi (Suhir vd., 2007). (b) Katmanlı CSP™ (Johnson vd., 2005).

Üretim ve montaj teknolojilerindeki tüm çaba ve önlemlere karşın BDK arızaları önlenememektedir. Bunların nedenleri mevcut üretim teknolojilerinin kısıtları ve ağır çevresel kullanım şartları ile ilgili olup iki ana grup altında sıralanabilir.

1. Üretim teknolojilerinin kısıtları nedeniyle ortaya çıkan tamir gereksinimi. Bu kapsamda etkili olan faktörler şunlardır;

a. EDE'nin çevresel etkenler nedeni ile (nem alması vb.) fonksiyonunu üretim sonrası tam olarak yerine getirememesi.

b. EDE'nin iç yapılarında ortaya çıkan (tasarım kaynaklı, MK üretimi kaynaklı problemler, vb.) hatalar ve EDE'nin sınırlı ömürleri. Bu kapsamda aşağıda BGA ve CSP devre elemanları veya paketlerinin maksimum termal döngüdeki ömürleri verilmiştir;

(1) Ticari Plastik Gövdeli BGA'lar kısa ve uzun görevlerde NASA'nın hızlandırılmış testlerde kullandığı -55 °C/100 °C döngüsüne 500 kez dayanabilmekte, daha ağır termal döngülerde arızalanmaktadır. Buna karşın seramik ve plastik gövdeli CSP'ler sadece kısa görevlerde -55 °C/100 °C döngüsüne 500 kez dayanabilmektedir (Ghaffarian, 2003). Johnson vd. (2005) -40 °C/+125 °C döngüsüne maruz kalan CSP ortalama ömürlerini, tek katlı CSP için 1200 termal döngü olarak vermekte ve artan katman sayısı ile ömrün azaldığını belirtmektedir.

(2) Hızlandırılmış test verisinden yararlanarak normal koşullarda kullanım ömrü de tahmin edilebilmektedir. Eğer kullanım sırasında termal döngü günde bir sefer oluşur ise hata oranı milyonda 1000 (1000 ppm) olan bir paketin ömrü en fazla 15 yıl olabilmektedir. Bu tahmin değeri 0-100 °C termal döngüsüne maruz kalan plastik gövdeli 225 terminalli BGA paketler için verilmiş ve BGA'ların sadece ilk %0,1'inin testlerde arızalandığı termal 5000 döngü değeri (ki hata oranı 1000 ppm'e karşılık gelmektedir) verilmiştir (Bogatin vd., 1997; Li ve Sun, 2017).

c. Genel olarak, MK'nın üretim esnasında tamir görme olasılığı %10 ile %30 oranında değişim göstermektedir (Geren, 2001). Bu oranlar kozmetik tamir (touch-up) olarak adlandırılan terminal bağlantılarına lehim ekleme ve benzeri işlemleri de içermektedir.

2. Ağır çevresel kullanım şartları nedeniyle ortaya çıkan tamir gereksinimi nedenleri ise şunlardır;

a. Hassas elektronik malzemelerin tipik rezonans (tınlaşım) frekansları rastsal titreşimin yüksek frekans bandında yer almaktadır. Bu frekans bandını

sönümlemekte zayıf kalan titreşim izolatörleri hasarsız bir titreşim çalışma koşulu sağlamakta yetersiz kalmaktadır (Çelik ve Genç, 2010). Termal döngü nedeniyle oluşan termal gerilmeler kılcal çatlaklar ile başlayan yorulma hasarlarına neden olmaktadır (Grosshardt vd., 2019).

b. Üretim aşamaları sürecinde oluşturulan kalıcı gerilmeler (Lau vd., 2012) çalışma şartları altında kalıcı hasarlara (lehim bağlantı terminallerinin kopması, zayıflaması vb.) dönüşmektedir.

c. Üretim sonrası nihai kullanıcıya gelmeden önce tamir gören kartlarda uygulama hataları nedeniyle oluşan yeni problemlerin kullanım esnasında tetiklenmesi.

ç. Üretim sonrası MK üzerinde kalan kimyasal kalıntıların (lehim pastası) korozyonu sonucu BDK terminallerinin kopması, el montajı sırasında bırakılan izler vb. sonucu lehimlerin terminallerden ayrılması.

d. Kazalar neticesinde şiddetli darbelerin oluşturduğu hasarlar.

Görüldüğü gibi malzemenin ve kullanım şartlarının doğası gereği elektronik arızalar kaçınılmazdır. Neredeyse tamamı ileri teknoloji ürünü olan teçhizatın MK arızası nedeniyle atılması ise ekonomik ve akılcı değildir. Stratejik olanı ise tamir edip en azından yedek olarak saklamaktır. MK tamirinin esas amacı, kartın güvenilirliğini ve tüm performansını kötü yönde etkilemeden ekonomik bir biçimde hatalı elektronik elemanı yenisi ile değiştirmek ve/veya veri yollarını tamir etmektir. Bu çalışmada sadece MK üzerinde yer alan hatalı/arızalı EDE'nin yenisi ile değiştirilmesi ele alınacaktır. Fonksiyonel testin tamamlanmasından sonra tamir görecektek devre elemanına uygulanması gereken temel tamir işlem basamakları ise şu şekildedir:

1. MK'yı hazırla.
2. Lehim pastası uygula.
3. Ön ısıtma uyguladıktan sonra lehim ergit.
4. Arızalı devre elemanını sök.
5. Ped terminallerindeki lehim temizle.
6. Lehim pastası artıklarını temizle.
7. Pedlere krem lehim uygula.
8. Devre elemanını pedler üzerine yerleştir.
9. Ön ısıtma uyguladıktan sonra lehim ergit.
10. Ped terminallerindeki lehim temizle.
11. Kontrol et.

MK tamiri, en az MK üretimi kadar önemlidir. Delik-içi (Through-Hole) elemanların tamiri uzun yıllardır sürdürülmektedir ve nispeten kolaydır. Son yıllarda konvansiyonel YM, dört taraflı yassı paket (QFP) gibi terminalli paket tipleri ile birlikte ızgara dizimli (BGA, CSP gibi) paketlere geçilmiştir. Bu paketleri içeren MK tamiri, konvansiyonel YM EDE içeren MK'lardan çok daha zordur. Buna karşın ilgili konuda yayımlanmış Türkçe kaynaklar ise çok sınırlıdır. Yeni nesil YM EDE'nin manuel tamir uygulamasının işlem basamakları ve her işlem basamağının öneminin ve gereksinimlerinin bilinmesi en az MK üretim süreci kadar ulusal sanayimiz için önemlidir. Bu çalışmanın amacı yaygın olarak kullanıma giren yeni nesil YM EDE'nin tamir prosedürü ve tamiri etkileyen faktörleri belirlemektir. Çalışma, önce konvansiyonel YM EDE içeren genel MK tamiri ve lehim teknolojisi ile ilgili temel bilgileri daha sonra ise yeni nesil YM EDE'nin tamir süreci ve gereksinimlerini vermektedir. Bu çalışma, hem manuel tamir için hem de otonom MK tamir imalat sistemlerini geliştirmek için gerekli imalat süreçlerinin yapılandırılmasını sağlar. Çünkü imalat veya yeniden imalat sistemlerinin süreç otomasyonları ancak imalat süreçleri ve gereksinimleri en doğru şekilde kurgulanırsa geliştirilebilir. Böylece mekanik donanım (robot, lehimleme lazer teknolojileri vb.) süreç kontrol fonksiyonlarını gerçekleştirecek yazılım ve ilgili donanım gereksinimleri de belirlenebilir.

Üretim Sürecinde MK Tamir Gereksinimi ve Son Gelişmeler

Üretim Sürecinde MK Tamir Gereksinimi

Herhangi bir MK'nın üretim esnasında tamir görme olasılığı üretici firmaya bağlı olarak %10 ile %30 oranında değişim göstermektedir (Geren, 2001). Bir MK üretimi üç farklı hata kaynağı barındırır (Foster, 2019). Bunlar Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. MK Üretiminde Hata Kaynakları ve Değerleri.

BDK Tedarikçilerinden Gelen Hatalı BDK ve EDE Hataları	EDE Montaj Hataları	Lehim Hataları
Milyonda 50-5000	Milyonda 100-1500	Milyonda 50-1000

Hata yüzdesinin hatalı BDK-EDE çifti ve lehim hataları için sırası ile milyonda 50 ($5 \cdot 10^{-5}$) ve 100 ($1 \cdot 10^{-4}$) olduğu göz önünde bulundurulduğunda % olasılıklar sırası ile ($1 - 5 \cdot 10^{-5} = 0,99995$) 0,99995 ve ($1 - 1 \cdot 10^{-4} = 0,9999$) 0,9999'dur. Üzerinde 100 EDE ve 1000 lehim bulunan bir MK da milyonda 50 ve 100 hata barındırma durumu için sırası ile hatalı BDK-EDE çifti ve lehim için hata oranları istatistiki olarak şu şekilde hesaplanabilir:

Hatalı BDK-EDE çifti için $0,99995^{100} \cdot 100 = \%99,50$ ve

Lehimleme için $0,9999^{1000} \cdot 100 = \%90,48$ 'dir.

Bu durumda toplam başarı oranı hatalı BDK-EDE çifti ve lehimlemenin başarı oranı ile çarpılarak bulunur ve bu oran %90,03'tür (Geren, 2001). Yukarıdaki örneklemede en düşük hata oranları kullanılmış ve EDE montajlama (milyonda 100-1500 arası) hataları da eklenmemiştir. 0,635 mm adımlı (25 mil pitch) tek bir BGA'nın 432 adet lehim bağlantı noktası içerdiği göz önünde bulundurulduğunda, yukarıda verilen üretim başarı oranlarının çok azalacağı açıktır. Günümüzde MK üzerinde yer alan lehim bağlantı sayıları binler ile ifade edilmektedir. Tek bir Flip-chip (fiskeli yonga teknolojisi) BGA (FCBGA) paketi 1924 adet lehim terminaline sahiptir (Du, 2018). Bir MK 10 adetten fazla BGA ile birlikte çok sayıda EDE içerebilir. Görüldüğü gibi elektronik üretimde tamir gereksinimi kaçınılmazdır ve en başarılı üreticiler dâhil tüm elektronik MK üreticileri üretim hatlarında tamir veya tekrar/yeniden imalat birimleri bulundurmaktadır. Elektronik üreticilerinin %10 ile %30 arasında değişen MK tamir oranları sıklıkla %5 ile %25 arasında ek üretim maliyetine neden olmaktadır (Geren vd., 1992; Foster, 2019). Genellikle maliyeti azaltma ve endüstriyel atık miktarını düşürüp çevre zararını azaltmak amacı da sürdürülmektedir. MK'da yapısal hasarlar oluşturduğu için üç defadan fazla tamir gören MK kritik önemi olan dijital sistemlerde kullanılmaz (Du, 2018).

Montajlı Kart Tamirindeki Son Gelişmeler

Ülkemizde de TH ve YM içeren MK'ların tamiri belirli bir başarı yüzdesi ile uzun yıllardan beri yapılmaktadır. Bununla birlikte yakın zamanda YM ızgara dizininli devre eleman paketlerinin (BGA, CSP, QFP ve FCs vb.) kullanımına geçilmiştir. Yeni nesil YM elemanların kullanımı MK tamirinde klasik yöntem ve ekipmanların (kalem tipi havya, lehim teli, lehim pastası, lehim ucu, ayaklı büyüteç vb.) kullanımını imkânsız hale getirmiştir. Ayrıca, yeni nesil EDE konvansiyonel tip,

YM EDE tamirinde karşılaşılmayan birtakım zorlukları da beraberinde getirmiştir (Philpott vd., 1999; Nguty vd., 2000; Ahlhelm, 2013). Yeni nesil YM eleman gövde altlarına geleneksel kılcal akışla dolun (capillary flow under-filling) veya yeni tip akıcı olmayan dolun yöntemi (no-flow under-filling) ile polimerik dolun malzemesi uygulanır. Polimerik malzeme EDE ile BDK arasında kalan boşluğu doldurur. Bu durum yeni nesil EDE'nin tamir işleminde ek termal gereksinimlerin karşılanma zorluklarının yanı sıra EDE'nin BDK üzerine montajı ve sökülmesinde de ek zorluk ve sıkıntılar oluşturmaktadır. Ayrıca, BGA ve CSP gibi yeni nesil EDE'nin bağlantı ayakları/terminaleri gövdelerinin altındadır ve bu bağlantı ayakları üstten görülemez. Bu nedenle de tamir işlemleri daha da zorlaşır. Buna ilaveten, her bir lehim topu veya terminalin tek tek tamirinin yapılamıyor olması da bütün tamir işlemini daha da karmaşıklaştırıp süreci zorlaştırmaktadır (Rupprecht, 2002; Horsley vd., 2002; Wood, 2003; Ahlhelm, 2013). Yukarıda bahsedilen faktörler ile birlikte diğer gelişmeler geleneksel YM ve yeni nesil YM tamir işlemlerinde sadece el ile (manuel) tamir sürecini değil, nerede ise imkânsız ve karmaşık hale gelen MK tamirini gerçekleştirecek otomatik tamir veya yeniden üretim (remanufacturing) sistemlerinin geliştirilmesinde kullanılacak otomasyon süreçlerini de etkilemektedir.

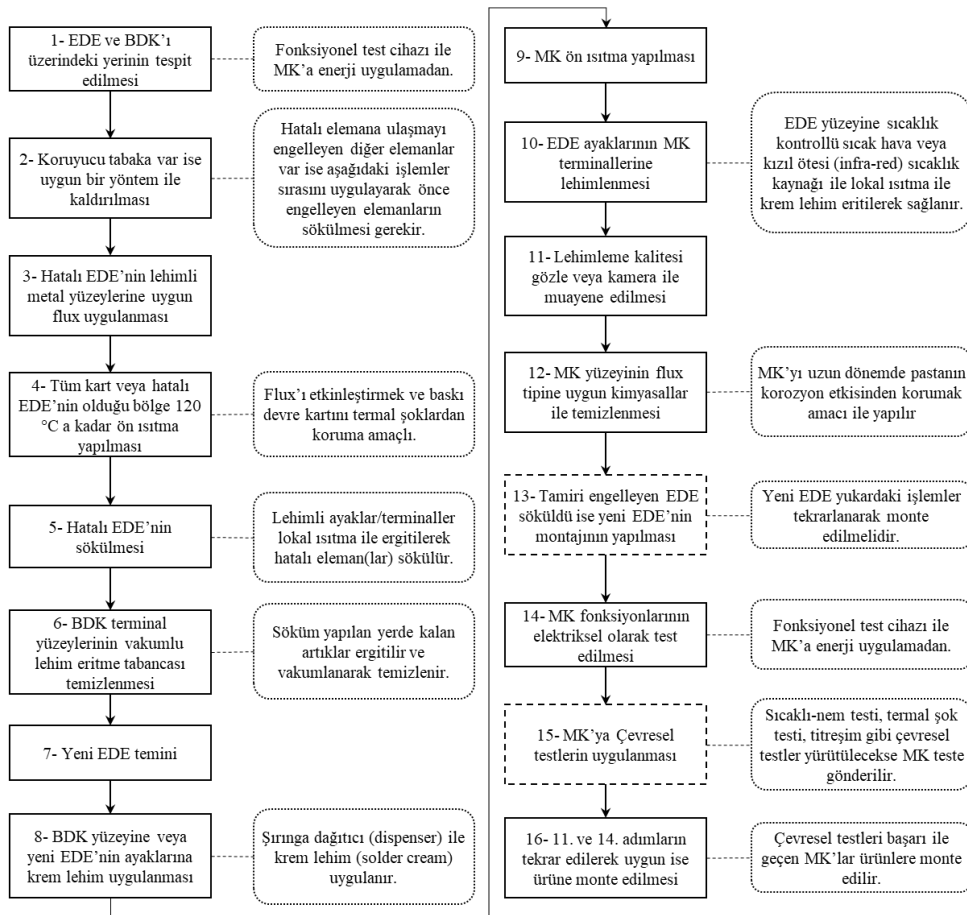
Bilye lehim topu dizinimli yeni nesil YM devre elemanlarının kullanımlarının giderek artacağı 20 yıl önce tahmin edilmiş olup (Chan vd., 2001; Yunus vd., 2003) veriler de tahminlerin gerçekleştiğini göstermektedir. Yakın zamanda büyük (>50mm), yüksek sayıda (1000+) fiziksel I/O (giriş/çıkış) ızgara dizinimli (Grid Array veya Area Array Packaging) paketlerinin tamiri ile ilgili konular tartışılmaya başlanmıştır. 2017 yılında bu paketler 60 mm'ye genişletilmiş, 2023 yılında ise bu paketlerin 75 mm olacağı tahmin edilmektedir (Czaplicki, 2013). Daha yakın zamanda BGA teknolojisinin gelişimi için verilen yol haritası da bu tahminleri doğrulamıştır (Lau vd., 2016). Muhtemelen 60 mm boyutundaki EDE'nin I/O yoğunluğu ikiye katlanacaktır. Yeni nesil EDE doğal yapıları gereği yüksek sıcaklığa duyarlıdır ve sahip oldukları her bir bilye lehim bağlantısının tek tek tamirinin yapılması pratik olarak mümkün değildir. Ayrıca lehim bağlantı terminaleri arasındaki (pitch size) adım veya aralık bazı elemanlarda 100µm'in altına inmeye başlamıştır ve bu değer daha da düşecektir (Yu ve Shangguan, 2013; Du, 2018). Netice itibarıyla, tamir işleminde müsaade edilebilecek olası hataların sınırları önemli derecede daralmış, gerekli hassasiyet ve tamir sürecinin kontrol edilebilirlik seviyesi ise manuel tamir yöntemlerinin kullanılmasına olanak

tanımayan seviyeye çıkmıştır. Bu nedenle de 1990'ların başından itibaren robot esaslı otomatik/otonom MK imalat ve tekrar imalat hücreleri (remanufacturing cell) geliştirilmesi çalışmalarına başlanmıştır (Geren ve Redford, 1996; Fidan vd., 1998; Geren, 2001; Geren, 2003; Geren vd., 2012).

Tamir Süreci

1. Geleneksel YM Elemanların Tamir Süreci

Geleneksel YM EDE'nin yenisi ile değiştirilmesi için gereken işlemler, sırası ile Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2. Geleneksel YM Elemanların Genel Tamir Prosedürü.

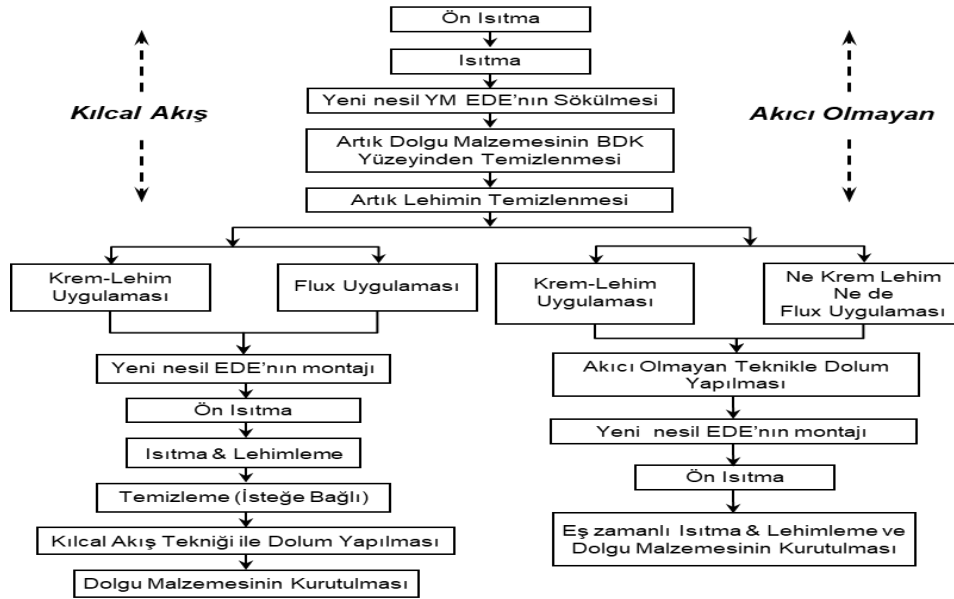
2. Yeni Nesil YM Elemanların Tamir Süreci

Elektronikteki hem yüksek güvenilirlikli hem de çevreyle dost ürün ihtiyacından dolayı dolgu malzemesi uygulaması (under-filling) ve özellikle kurşunsuz lehim kullanımı BDK montaj imalatında önemli bir yer edinmiştir (IPC Roadmap, 2000; Schwartz, 2014). Diğer taraftan dolgu ve kurşunsuz lehim kullanımı EDE'nin montajındaki ve doğal olarak tekrar üretim veya tamir işlemindeki sıkı kontrol gereksinimlerini daha da arttırmıştır (Chennagiri vd., 2011; Lau vd., 2016; Isaacs vd., 2017).

Dolgulu (underfilled) ve dolgunsuz (non-underfilled) EDE'nin tamir işlemi önceki bölümde verildiği gibi geleneksel YM elemanları ile benzerdir. İkisinde de hatalı EDE sökülür, BDK'nin ilgili ped yüzeyleri temizlenip yeni lehim uygulanır ve yeni EDE ped terminallerine yerleştirilip lehimlenir. Temel farklılık ise EDE ile BDK arasında dolgu malzemesinin olmasıdır ki, bu da özellikle tamir işleminde EDE'nin sökülmesi ve MK yüzeyinin temizlenmesi aşamalarında tanımlanması ve çözümlenmesi gereken yeni birtakım sorunlar doğurur (Wong vd., 1999; Wang ve Wong, 2000; Gowda vd., 2002; Isaacs vd., 2017). Ayrıca, dolgu malzemesi uygulanması tamir edilebilirliği kısıtladığı gibi montaj ve tamir prosedüründe ilave bir işlem basamağı oluşturur ve ayrıca tamir sürecinin değişmesine de neden olur. Bununla birlikte CSP ve FC EDE'de kürlendikten sonra ısıtıldığında yumuşadığından dolayı EDE kolaylıkla MK'dan sökülebilmektedir (Loctite, 2000; <https://www.henkel-adhesives.com>).

Literatürde yeni nesil YM EDE'nin tamir prosedürünün tamamını tüm yeni nesil EDE için veren bir çalışma Geren vd. (2006) tarafından yapılmış ve Şekil 3'te verilen genel tamir süreci oluşturulmuştur. Genel tamir prosedürü kılcal akışla ve akıcı olmayan dolum yöntemlerini de içeren iki farklı prosedürden oluşmaktadır ki, bu da dolgunun iki farklı yöntemle yapılabilmesi olmasından kaynaklanmaktadır. Bu yöntemlerden ilki elektronik imalatta uzun yıllardır uygulanan kılcal akışla dolum yöntemidir. Diğerisi ise BGA, CSP ve FC gibi yeni nesil YM EDE için kullanılan akıcı olmayan "dolgu-dolum" yöntemidir (Tu vd., 2001; Liu vd., 2002; Tong, 2013). "Kılcal akış" ve "akıcı olmayan" dolgu yöntemleri ayrıca krem lehim ve lehim pastası uygulaması adlı iki alt yöntem ayrılmıştır. Krem lehim veya lehim pastası uygulaması ihtiyacı yeni nesil YM EDE'nin devre bağlantı terminallerini (ped) oluşturan bilye lehimdeki metal bileşimine, lehim bağlantı terminalleri arası mesafeye (pitch size), EDE'nin gövdesinin yapısına, BDK'nin fiyatına, elektronik

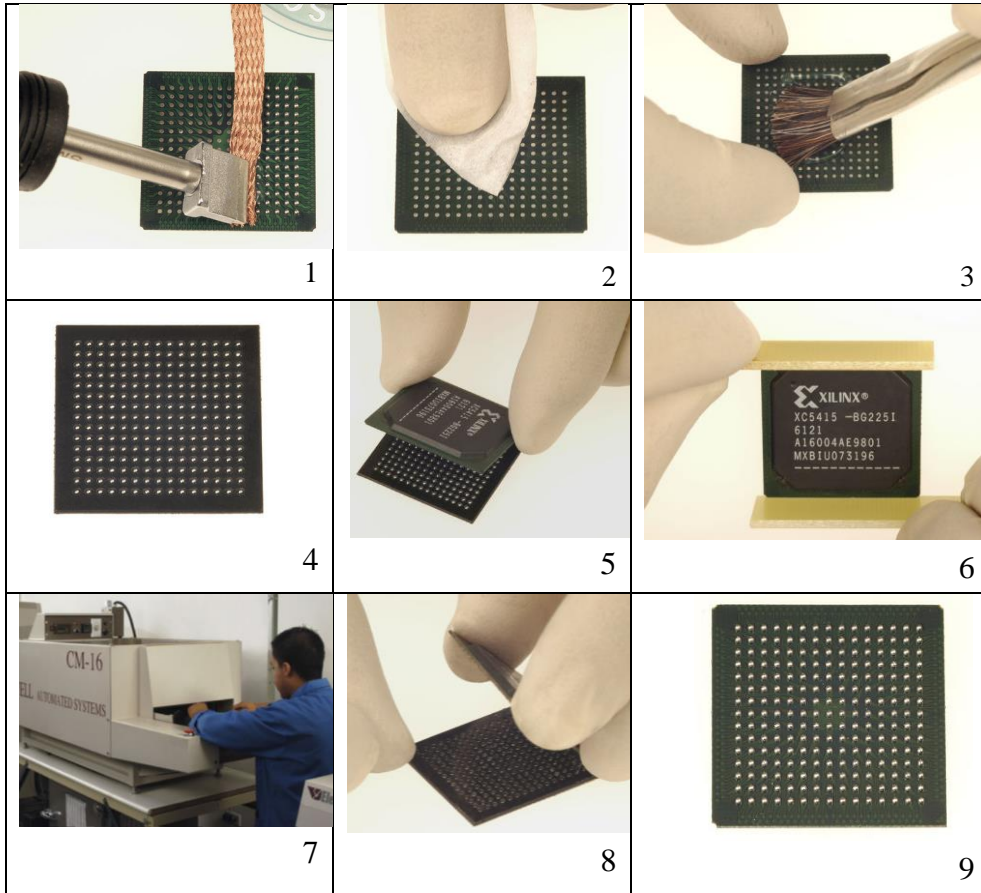
ürünün kullanılacağı yere vb. gibi çok çeşitli etkenlere bağlıdır. Lehim uygulanacak EDE BGA ve CSP'nin elemanlarına nasıl lehim uygulanacağı ise takip eden bölümde açıklanacaktır. Eğer EDE'nin bacakları veya terminalleri yan yüzeylerde olan paketlerden biri ise (QFP gibi) bu elemanların terminallerinin lehim kaplı veya lehimsiz olup olmadıkları önemlidir. EDE terminallerinde imalat öncesi lehim (pre-tinned) veya lehim bilyesi bulunduran EDE sadece lehim pastası uygulanarak lehimleme işlemine alınır. Buna karşın askeri ve uzay amaçlı yüksek güvenilirlik gerektiren endüstriyel uygulamalarda her durumda (lehim malzemesi ve EDE terminallerinin adımına bakılmaksızın) yeni EDE elemanı montajında ek lehim kullanımı önerilmektedir. Benzer şekilde ötektik olmayan lehim bilyesi kullanımlarında da ek lehim kullanımı tavsiye edilmektedir. Çünkü eklenen lehim içindeki lehim pastası yüzey oksitlerini çözerek lehimin yüzeye daha iyi ıslanmasını veya yayılmasını sağlamaktadır. Benzer durum EDE ile MK arasında ısıl genleşme katsayısı farklılığını ortadan kaldırmak için elastomer dolgu katmanı kullanılmış ise de geçerlidir (Licari ve Swanson, 2011).



Şekil 3. Yeni Nesil YM-EDE'nin Genel Tamir Prosedürü (Geren vd., 2006).

3. BGA ve CSP Elemanlarının Bilye Lehimleme Süreci

Köprü oluşumu, lehim çatlağı gibi nedenlerden dolayı MK'daki fonksiyonlarını yerine getiremeyen ancak kendisi sağlam olan ızgara dizimli EDE, tamir sürecinde BDK'dan sökülür. MK'dan sökülen BGA ve CSP gibi ızgara dizimli EDE'nin yeniden MK'ya lehimlenmesi için önce terminal yuvalarına bilye lehim toplarının yerleştirilmesi gerekmektedir. Şekil 4'te bu işlemin adımları verilmiştir (Schwartz, 2014; <https://www.instructables.com>).



Şekil 4. BGA ve CSP EDE'nin Lehim Topu Uygulaması Adımları
(<https://www.instructables.com>)

Adım 1: Devre elemanından lehim topunu (bilyesini) uzaklaştır: Uygun bir fırça ile elemanın lehim terminali yüzeyine su ile çözünen lehim pastası uygulanır. Daha sonra lehim tipine bağlı olarak sıcaklığı ayarlanmış geniş ağızlı lehim havyası ile yüzeydeki lehim ergitilir ve lehimin, lehim havyası yüzeyine yapışması sağlanır. İşlem yapılan yüzeye tekrar lehim pastası uygulanır. Yüzeyde yer alan terminallerde kalan son lehimleri uzaklaştırmak için bakır örgülü fitil üzerine sıcak havya Şekil 4, Adım 1’de verildiği gibi yavaş ve hafifçe aşağı-yukarı uygulanır. Yüzeylerin ve terminallerin zarar görmemesine özen gösterilir.

Adım 2: Lehim topu uzaklaştırılan yüzeyleri temizle: İzopropil ve statik elektrik barındırmayan ve üretmeyen temizlik bezi ile lehim topu uzaklaştırılan yüzeyler temizlenir.

Adım 3: Lehim pastası uygula: Elemanın terminal yüzeyleri herhangi bir hataya karşı incelenir. Uygun bir fırça ile elemanın lehim terminali yüzeyine su ile çözünen lehim pastası tüm yüzeyde eşit bir şekilde dağıtılır.

Adım 4: Lehim topu kalıbı ile kalıplama: Devre elemanına uygun lehim topu kalıbı temin edilir. Lehim topu yerleştirme kalıbı (reballing insert preform) bilye top yuvaları yukarı bakacak şekilde yerleştirilir. Uygun çap (0,10-0,76 mm vb.) ve özellikteki lehim topları kalıp yüzeyine yayılır, fazla olanları yüzeyden hafifçe süpürülür. Tüm BGA kalıplama kalıp yuvalarının lehim topu ile dolu olduğundan emin olunmalıdır.

Adım 5: BGA’nın lehim topu kalıplama üzerine yerleştirilmesi (sandviçleme): BGA’nın bilye topu terminallerinin BGA lehim topu kalıbı üzerine tam ve doğru oryantasyonda oturtulduğundan emin olunmalıdır.

Adım 6: BGA lehim topu kalıbı ile BGA’yı aynı karede hizalama: Uygun hizalama aracı (Şekil 4) kullanılarak BGA lehim topu kalıbı ile BGA aynı karede hizalanmalıdır.

Adım 7: Lehimleme: Üst-üste yerleştirilen BGA ve lehim topu kalıbı lehimleme fırınına konular veya sıcaklık profili ayarlanabilen uygun bir lehimleme sistemi ile sandviç arasındaki lehim topları ergitilir.

Adım 8: BGA lehim topu kalıbının ayrılması: Lehimleme işlemi sonrası sandviç yapı hala ılık iken lehim topu kalıbı BGA’dan ayrılır. Lehim topu kalıp yuvaları içindeki tüm lehim bilyelerinin BGA’ya transfer edilip edilmediği kontrol edilir. Daha sonra yüzeyler temiz su ve yumuşak fırça ile temizlenir. Maske ve EDE terminallerinin durumu tekrar incelenir; çünkü maskelerde oluşacak en küçük hata,

terminaller arası köprü ve kısa devre oluşumuna yol açabilir (Gowda vd., 2001; IPC, 2011).

Adım 9: Bilyelenen elemanın incelenmesi: Son aşamada BGA veya CSP üzerindeki lehim bilyelerin kalitesi mikroskop veya büyüteç altında ilgili standartlara uygunluk açısından incelenir. Uygun ise EDE, BDK üzerindeki terminallere yerleştirilip, ısı uygulanarak BDK'ya lehimlenmeye hazırdır (IPC, 2011).

MK'dan sökülen ızgara dizinimli EDE arızalı ise yenisi ile değiştirilmesi gerekir. Bu durumda Şekil 4'teki tamir veya yeniden imalat süreci Adım 3'ten başlatılır. Ayrıca bu sürecin Şekil 2'de verilen genel tamir süreci içindeki konumunun Adım 6 ile 9 arasında olduğu dikkate alınmalıdır.

Yukarda verilen her adım kendi bünyesinde çok önemli kriterlerin yerine getirilmesini gerektirir. Bununla birlikte, lehim pastası, ön ısıtma ve lehimin ergitilmesi aşamaları MK'nın işlevini sürdürmesini doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle, MK tamir sürecini etkileyen önemli faktörler takip eden bölümde ele alınacaktır.

Tamirde Etkili Süreç Adımları

1. Lehim Teknolojisi ve Etkili Faktörler

a. Lehimleme

Ergimiş lehim iki metal yüzey arasında bağlantı sağladığında, gerçekte diğer metal yüzeyler ile kimyasal reaksiyona girerek metaller arası metalurjik bağ oluşturur. Bağın kalitesi iki faktöre bağlıdır; bunlardan biri lehimlenecek metallere metalurjik olarak uygun lehim seçimi ve diğeri ise metal yüzeylerin (metalik bağ önleyici) oksit, yağ ve kir içermemesidir. Her ne kadar lehimlenecek yüzeyler temiz gözüксе de metaller oksijen ile reaksiyona girerek yüzeylerde oksit tabakası oluştururlar ve lehimlemeyi çok zor hatta bazen imkânsız hale getirirler. Bu nedenle de metal terminal bağlantı noktalarında yeterli metalurjik bağ oluşmaz (Schwartz, 2014). Sonuç olarak; üretim esnasında bağlantılar arası köprü oluşumu, yeterli mekanik bağ oluşmama ve ayrıca iki terminalli (direnç ve kapasitör gibi) EDE'nin bir ayak üzerine dikilmesi (tombstone) vb. hatalar oluşur. Savunma sanayi gibi ağır kullanım koşullarında ise MK'nın sıcak-soğuk çalışma döngüsü, titreşim veya darbelere açık kullanımı eksik/yetersiz bağ hatalarını tetikleyebilir. Bunun

sonucunda lehim bağlantısının kopması, EDE bacalarının terminal yüzeylerinden ayrılması gibi MK arızaları ortaya çıkabilir ve MK elektronik fonksiyonunu yerine getiremez. Uygun sıcaklık ve lehim pastası kullanımı sözü edilen bağlantı problemlerini ortadan kaldırmanın en iyi yoludur (Naugler, 2002).

b. Lehim pastası

Halk dilinde lehim pastası ancak teknik uygulamada “flux” olarak adlandırılan bu kimyasal yukarıda özetlendiği gibi lehimli bölgedeki oksitli yapıyı kaldırmak için ihtiyaç duyulmakla birlikte devre elemanı sökülürken kart yüzeyindeki lehimin dikit yapı almasını önlemek ve ısı transferini iyileştirmek için de kullanılır. Lehim pastası, hatalı elemanın lehimli metal yüzeylerine fırça veya spreyleyerek uygulanır.

Oksitlenme her sıcaklıkta olur, fakat lehimleme gibi 180-200 °C’deki yüksek sıcaklıklar altında hızla artar. Lehim pastası metal yüzeyleri temizler ve oksitlenmiş yüzeyler ile reaksiyona girerek yüzeyleri lehim bağı oluşturmaya en uygun hale getirir. Lehim pastası, görece yüksek sıcaklıkta gerçekleşen lehimleme boyunca yüzeyde kalarak, yüksek sıcaklık altında yeni oksit tabakalarının oluşumunu da engellemelidir. Lehim metalinde olduğu gibi, her biri farklı gereksinimler ve sınırlamalar içeren farklı çeşit (reçine (rosin flux), suda çözünen organik asit, temizleme gerektirmeyen (no-clean), ve inorganik asit) lehim pastası bulunmaktadır. Üretim hattında tekrar üretim kapsamında yapılacak YM eleman tamirinde (BGA ve CSP için Şekil 4, Adım 3’e bakınız) lehim pastası asit içeriği en az olanı kullanılmalıdır. Bununla birlikte uzun yıllar kullanım sonunda tamir edilmesi gereken MK’nın lehim bağlantı noktalarında daha kalın oksit tabakası oluşacağı için yüksek asitli lehim pastası kullanmak gerekebilir. Her iki gereksinim için kullanılacak lehim pastasının ergime sıcaklığı lehim malzemesinden çok daha düşük olmalıdır. Böylece lehimleme başlamadan lehim pastası yüzey oksitlerine nüfus ederek görevini yerine getirebilir. Görüldüğü gibi lehim pastası, MK üretimi esnasında ve üretim sonrası gerçekleştirilen tamirde kullanıma bağlı olarak farklı özellikler içermelidir (Tsenev, 2019).

Reçine (rosin) lehim pastası ısıtıldığında sıvı hale geçer ve hızlı bir şekilde oksit tabakayı kaldırır ve yüzey üzerindeki yabancı parçacıkları dışarı iter. Soğuduğunda ise katılaşır ve tepkimeye (inert) girmez. MK’nın kullanıldığı ortam sıcaklığının yüksek olmadığı uygulamalarda yüzeyde kalabilir. Ancak ortam sıcaklık artışının yüksek olduğu uygulamalarda lehimli yüzeyleri korozyona uğratıp lehimli

yok edebilir. Bu nedenle tamir sonrası reçine tipi lehim pastası artıklarının tamamının alkol ile temizlenmesi gerekir, aksi halde uzun dönemde BDK ped veya terminallerini yok edebilir ve BDK tamiri mümkün olmayabilir (Schwartz, 2014; Grosshardt vd., 2019).

Suda çözünen organik asit lehim pastaları en yaygın kullanılan pasta çeşididir. Organik asit lehim pastaları reçine çeşidine göre daha güçlüdür ve oksit tabakasını daha hızlı temizler. Ayrıca, su ile temizlenebilir. Bu malzemenin kalıntıları elektriksel olarak iletken olduğu için MK'nın performansına ve çalışmasına olumsuz etki edeceği için mutlaka temizlenmelidir. Aksi takdirde tamir sonrası MK yeni arızalara açık hale gelir (Grosshardt vd., 2019).

İnorganik lehim pastası çok yüksek asit ve korozyon etkisi nedeniyle elektronik ve elektriksel uygulamalara uygun değildir. Kesinlikle MK tamirinde kullanılması tavsiye edilmez. Ayrıca bazı üreticiler tamir esnasında jel-esaslı yüksek viskoziteli lehim pastası kullanmayı önermektedir. Tsenev (2019) bu uygulamanın başarısını destekleyen bulgular sunmuştur.

c. Lehim seçimi

YM elemanların lehiminde (BGA ve CSP EDE hariç) krem kıvamında olan ve krem lehim olarak adlandırılan lehim kullanılır. Lehim pastası ayrıca, krem-lehimin en önemli bileşenidir. Bu nedenle lehimin lehim pastası içeriği krem-lehim seçiminde dikkate alınmalı ve lehim pastası seçiminde kullanılan kriterlere uymalıdır. Yeni nesil YM ızgara dizininli EDE'lerin tamiri için ise lehim topu kullanılmaktadır. Lehim ergime sıcaklığı ve süreci kalay/kurşun oranına bağlı olarak değişim gösterir. %50 kalay ve %50 kurşun oranına sahip olan lehimin ergimesi 183 °C'de başlar 216 °C'de tamamlanır. Bu sıcaklıklar arasındaki lehim malzemesi plastik veya yarı-sıvı durumunda kalır. 60/40 oranında ergime aralığı 50/50 oranından daha azdır. 63/37 oranında ise lehim 183 °C'de aniden ergir. Son iki tip karışım MK tamiri için daha uygundur (Circuit, T.C., 2019). 60/40 oranlı lehimin plastik davranışı nedeniyle, lehimin soğuma periyodunda lehim bağlantı elemanlarının hareket etmemesi gerekir. Donma esnasında lehimin hareket ettirilmesi, bağlantı elemanlarında rahatsız edilmiş bağlantı (disturbed joint) adı verilen düzensiz pürüzlü bir yüzey oluşturur ve lehim yüzeyi parlak değildir. Bu nedenle lehim donuk (mat) gözükür. Rahatsız edilmiş bağlantının güvenilirliği düşüktür ve yeniden tamiri gerekebilir (Xie vd., 2019). Rahatsız edilmiş lehim

bağlantıları kozmetik tamir kapsamında değerlendirilmekle birlikte birçok üretici lehim güvenilirliğini arttırmak için lehimi yenilemektedir. Bu durum savunma sanayi alanında da uygulanmalıdır.

Lehim ile ilgili önemli olan diğer bir konu ise uygulanacak lehim miktarıdır. Lehim miktarının gereğinden az kullanılmasının termal döngü sayısını azalttığı ve buna bağlı olarak EDE'nin kullanım ömrünü azalttığı tespit edilmiştir (Sriperumbudur, 2016). Bu nedenle lehimleme sonrası EDE'nin ped veya terminallerindeki lehim miktarı incelenmelidir.

2. Montaj ve Tamir için Lehim Ergitme Gereksinimleri

a. Ön Isıtma ve Lehimleme Sıcaklıkları: Ön ısıtma MK'nın ve EDE'nin olabildiğince termal şoktan koruyabilmek için yerel olarak uygulanır. Ön ısıtmada tavsiye edilen sıcaklık artışı $2\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ 'yi geçmemelidir. Aksi durumda özellikle seramik paketli EDE çatlar. Daha da önemlisi termal genleşme katsayıları farklı olan çeşitli malzemelerin katmanlarından oluşan baskı devre kartı, katmanlarına ayrılarak işlevini yitirebilmektedir (Geren ve Redford, 1994). Fakat BGA paket tiplerinde ön ısıtma için tavsiye edilen maksimum sıcaklık artışı (bakınız Şekil 6) $3\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ 'dir (Intel 2007; Intel Guide, 2016).

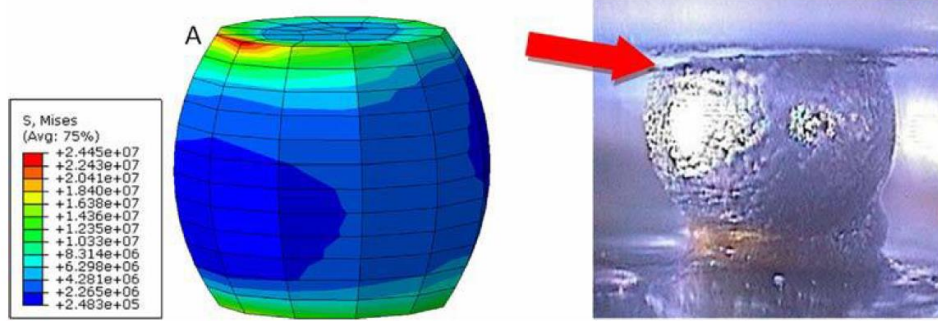
Lehimleme esnasında elemanın tümü ısıya maruz kalıyor ise eleman sıcaklığının saniyede $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ den fazla artması elemanın daha montajı yapılmadan aşırı sıcaklık artışı sonucu bozulmasına neden olur. Yine aynı şekilde tamir esnasında elemanların $220\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve üzerindeki sıcaklığa 10 saniyeden fazla maruz kalması durumunda EDE'ler işlevlerini yitirebilmektedirler.

Tamir esnasında yüksek sıcaklıklarda ısıtma işleminde MK üzerindeki sıcaklık gradyanının $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ den fazla olması, BDK'nın, elemanlara ve lehim bağlantılarına zarar verir (Nguyen, 2003). Lehimleme esnasında yüksek sıcaklıkların kullanılması ve işlemin uygulama süresinin uzatılması lehim iç yapısında büyüme (intermetallic growth) oluşturur (Schwartz, 2014). Bu oluşum lehim bağlantı noktasında kırılabilirliği arttırdığı için bağlantının yorulma dayanımı azalır. Sürekli sıcak-soğuk termal döngüsü sonucu yorulmaya maruz kalan MK üzerindeki lehim bağlantıları, bir süre sonra çatlak, terminal/bacak kopması gibi arızalar oluşturarak MK'nın işlevini sonlandırır.

BDK çok değişik yapı ve katmanlardan oluşur. Ayrıca, MK yüzeyinde farklı boyut, özellik ve sayıda EDE bulunmaktadır. BDK'nın bu özelliği tamir esnasında

her bölgeye uygulanacak ısı yükü farklılaştırmaktadır. Bu nedenle tamir esnasında mutlaka geri besleme sıcaklık kontrollü kızıl ötesi ışıma (Infra-red), yönlendirilmiş sıcak hava gibi komşu EDE'ye en az etkili lokal ısıtma yapabilen lehim ergitme sistemleri kullanılmalıdır (Geren vd., 2011; Ahlhelm, 2013). Örneğin, ısı yükü fazla olan bir lehim ergitme sisteminin, ısı yükü az olan bir bölgede kullanımı, o bölge yakınındaki elemanların lehimlerinin ergimesine veya ergime noktasına yaklaşmasına da neden olur. Tamir gören elemana yakın bölgelerde sıcaklığın ergime noktasına yaklaşması lehimin iç yapısını bozar. İç yapıdaki bozulma sürekli ısınma-soğuma termal döngüsünde çalışan lehim bağlantısının yorulma kırılması oluşumunu hızlandırır (Lau vd., 2012).

Lehim bağlantı kalitesini etkileyen diğer bir faktör de lehimin soğuması evresidir. Lehimleme işlemi sonrası hızlıca soğutulan lehim bağlantılarında daha küçük lehim tanecik boyutu olduğu için bağlantının yorulma dayanımı artmaktadır. Fakat çok hızlı soğutma, MK yüzeyinde tercih edilmeyen sıcaklık gradyanı oluşturarak, MK'nın çarpılmasına neden olur. Çarpılma o bölgedeki tüm bağlantılarda daha sonraki dönemlerde MK'nın çalışmasını etkileyecek kalıcı zararlar oluşturur (Su vd., 1997; Ahlhelm, 2013). Benzer problemler BGA gibi büyük EDE için de söz konusudur. Örneğin BGA gibi elemanlar lehimleme fırınında soğurken, yüksek von-Mises eğilme gerilmelerinin oluşturduğu deformasyona maruz kalmaktadır (Lau vd., 2012). Lau vd. (2012), bu gerilme değerlerinin lehim BGA gövdesi birleşiminde 24.5 MPa'a ulaştığını deneysel ve bilgisayar destekli analizlerde göstermişlerdir. Bu gerilme değeri ise lehimin 20 MPa civarında olan akma dayanımı değerinin üstündedir (Jun vd., 2004). Hızlı soğuma sırasında oluşan yüksek gerilmeler nedeniyle de başlangıç çatlakları oluşarak Şekil 5'te gösterilen "A" noktasından (lehim topu ve devre elemanı tabakası (substrate) arasında oluşan) inter metalik (IMC layer) katmana ulaşır. Bunun sonucu olarak da MK'nın termal döngü ömrü kısalır. EDE ve MK deformasyonlarının kaynağı ise yapıyı meydana getiren malzemelerdeki termal genleşme katsayısı değişkenlerinin farklılığıdır.



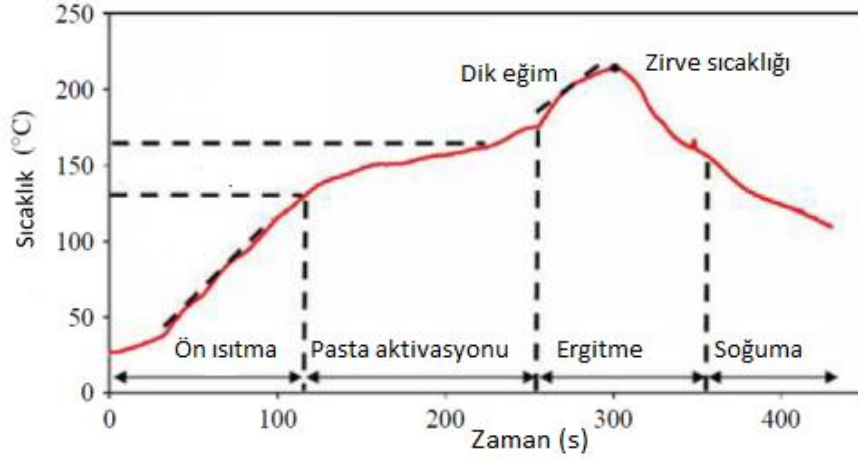
Şekil 5. Deneysel ve Bilgisayar Destekli Analizler ile BGA Lehim Topunun Soğuma Esnasındaki Bulgularının Karşılaştırılması (Lau vd., 2012).

b. Zirve Sıcaklıkları: Öncelikle EDE için en uygun lehim ergiticiyi seçebilmek için standart geleneksel ve yeni nesil YM EDE'nin termal gereksinimleri belirlenmelidir (Cluff ve Pecht, 2001; Naugler, 2002).

Lehim ergitme ve tekrar lehimleme işlemlerinde ideal bir lehim ergitme sıcaklık-zaman (termal) profili EDE cinsi ve MK üretici tavsiyeleri ile belirlenmeli (reflow profile) ve süreç gerekli işlem parametreleri göz önünde tutularak yürütülmelidir (Intel Guide, 2016). Lehim ergitme ve tekrar lehimleme esnasında kullanılacak zirve sıcaklığı, Şekil 6'da verilen sıcaklık-zaman profilinden görüldüğü gibi, lehim ergitme sıcaklığı ve EDE sıcaklık toleransına bağlı olarak belirlenir (Lau vd., 2012). Tamir esnasında komşu EDE'nin aşırı ısınmasını, BDK'nın çarpılmasını ve EDE'de oluşabilecek yapısal bozuklukları önlemek için lehim ergitme için kullanılan ısıtma sistemi seçimi önemlidir (IPC, 2011; Ahlhelm, 2013). Lehim ergitmek için kullanılacak termal enerji doğrudan yeni nesil elemanın gövdesinden geçip bilye lehim bağlantısına ulaşacak şekilde dikey olarak uygulanmalı ve komşu EDE ısıdan minimum düzeyde etkilenmelidir. Diğer bir deyişle gövdeden lehimlere ısı transferi iletim (kondüksiyon) ile gerçekleşmelidir.

EDE'nin sökme işlemi aşamasında, EDE ile BDK arasındaki lehim bağlantılarını tamamıyla ergitmeye yetecek miktar ve sıcaklıkta ısı uygulanmalıdır. Çünkü yeterli olmayan sıcaklıklarda lehim bağlantıları tam olarak ergimeyecek hatta EDE'nin sökme işlemi sırasında BDK'nın üzerinde bulunan bakır terminalleri (copper traces), lehimin bulaşmasını önleyici tabaka (solder masks) gibi kısımlar hasar görebilecektir.

Tamir esnasında kullanılacak termal sıcaklık profili Şekil 6'da verilen üretim esnasında kullanılan termal profile yakın olmalıdır (Intel Guide, 2016).



Şekil 6. Yeni Nesil EDE için Üretimde ve Tamirde Kullanılan Tipik Lehim Ergitme (reflow) Termal Sıcaklık (°C)-Zaman (s) Profili (Tsai, 2009; Lau vd., 2016).

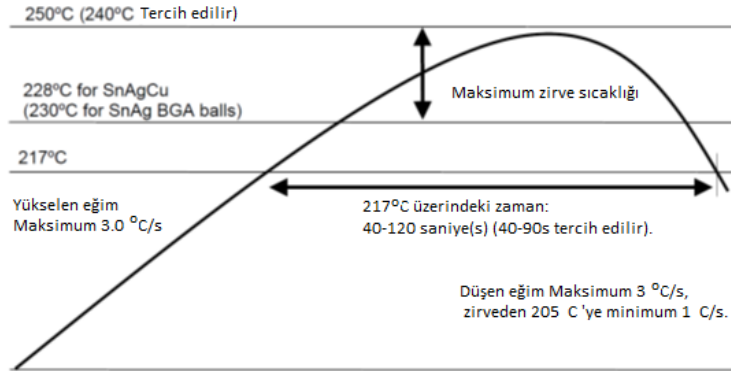
Yenisi ile değiştirilen EDE'nin montajı esnasında iyi bir lehim bağlantısı elde etmek için ilgili lehim bağlantılarının sıcaklıkları lehim ergime sıcaklığından yüksek olmalıdır. Ayrıca, bu sıcaklıklarda yeterli lehim pastası aktivasyonu ve sıvı lehimin yüzey gerilimi ile uygun bir şekil (yayvan kubbemsi) alabilmesi için belirli bir süre beklenmelidir (Primavera, 1999; Cluff ve Pecht, 2001; Naugler, 2002). Genel bir yaklaşımla, krem lehimin, lehim ergitme termal profilindeki en yüksek sıcaklığa kadar ısıtılması zorunludur. Bu sıcaklık, lehimin ergime sıcaklığından 20 °C ila 50 °C daha fazladır (Su vd., 1997; Primavera, 1999). Genellikle ötektik kalay/kurşun (Sn/Pb) lehim alaşımı için lehim bağlantısının ergime sıcaklığının 205 °C~235 °C arasında olması önerilir (Blackwell, 2000). Bununla birlikte, yeni nesil EDE'nin büyük bir çoğunluğu 240 °C-250 °C sıcaklığa dayanabilecek şekilde imal edilmiştir ve dolayısıyla tamir işlemi süresince en yüksek lehimleme sıcaklığı bu limitleri aşmamalıdır (Yang vd., 2001; Beckett vd., 2002; Wölflick ve Feldmann, 2002; Rupprecht, 2002; Intel Guide, 2016). 132 terminalli BGA'lar için lehimleme esnasında kullanılacak minimum zirve sıcaklığının, lehimin ergime sıcaklığının 25-30 °C üzerinde olması tavsiye edilmiştir (Lee, 2002). Lehimleme esnasındaki

zirve sıcaklıklarının belirtilenin altında olması durumunda soğuk/donuk bağlantı (cold-joint) ve bağlantılarda yeterli lehim ıslatması (wetting) elde edilemeyebilir (Lau vd., 2012).

Tamir işlemi boyunca ani yüksek sıcaklık farkları (>25 °C) lehim ergitme sıcaklığı gibi yüksek sıcaklıklarda zarar verici olabilir ve gerek BDK'da gerekse EDE'de termal şok etkisi yaratabilir. Bu da çarpımalara, EDE'nin iç ve dış gövde yapısında çatlamalara ve ayrıca istenilen kalitede lehim bağlantısı oluşmaması gibi sonuçlara neden olabilir (Russell, 1999; Primavera, 1999). Lau vd. (2012) BGA terminal noktaları arasındaki sıcaklık farkının 5 °C'den fazla olmaması gerektiğini belirlemiştir. Termal modelleme çalışması sonuçlarının deneysel olarak da doğrulandığı araştırma sonuçlarına göre aynı BGA üzerinde yer alan terminal sıcaklıklarının 8 °C'den daha fazla olması durumunda BGA gövdeleri çarpılmakta ve terminal bağlantıları ile teması (via open) kesilmektedir. Ayrıca BGA'nın terminalleri üzerinde açısız dönmesi (skew) mümkün olup bunun sonucu olarak terminallerde kısa devre (short circuit) oluştuğu belirlenmiştir.

Seramik gövdeli BGA (CBGA), Bant BGA'ların (Tape Ball Grid Array (TBGA)) 90 Pb/10 Sn alaşımli 302 °C ergime noktası olan lehim bilyeleri ile lehimlendiği de dikkate alınmalıdır.

Sonuç olarak, BDK'nın tüm yüzeyinde ve tamir yapılan EDE'nin gövdesinde sıcaklık dağılımının ve farklılıklarının makul seviyelerde olması önemlidir. İyi bir pratik kural olarak, genellikle yeni nesil EDE için tamir işleminin yapıldığı alan içerisindeki sıcaklık farklılığının 10 °C veya daha az olması sağlanmalıdır (Primavera, 1999; Wood, 2003; Li ve Sun, 2017). Buna ek olarak, EDE'nin normal soğutma hızı da 6 °C/s den düşük olmalıdır (Intel, 2007; Intel Guide, 2016). Ancak soğutma hızı ve sıcaklık ile ilgili diğer faktörler devre elamanına bağlı olarak değişmekte ve EDE üreticileri tarafından verilmektedir. Hızlı soğutmanın yapılması, lehim bağlantılarının ince taneli olmasına bağlıdır ve hızlı soğutma yorulma dayanımlarının artmasına neden olur (Su vd., 1997; Intel, 2007; Intel Guide, 2016). Örneğin Intel zirve sıcaklığından 205 °C'ye kadar 1-3 °C/s sıcaklık düşüşü önermektedir (Şekil 7). Soğutma hızının 1°C veya biraz daha yüksek değerlerinde lehim ince taneli mikro-yapı ile karakterize edilmektedir. Önerilen soğutma hızı uzun dönem güvenilirlik için gereklidir (Xie vd., 2019). Bu aralıkta hızlı soğutma lehimde inter-metalik yapının artmasına neden olmaktadır (Intel Guide, 2016). Ayrıca, tamir yapılan bölgenin yakınındaki EDE'nin sıcaklığı ise 150 °C'yi aşmamalıdır (Russell, 1999; Primavera, 1999).



Şekil 7. BGA EDE'lerin Sıcaklık-Zaman Profili (Intel 2007; Intel Guide 2016).

Görüldüğü gibi, tamir esnasında lehimleme işlemi için uygulanan ısı miktarı ve sıcaklık kontrol edilebilmeli, komşu elemanlar ısıtma işleminden etkilenmemeli ve ısı doğrudan elemanın gövdesine verilmelidir. Bu gereksinimler sadece lazer, yönlendirilmiş sıcak hava ve odaklı infra-red (IR) gibi ısıtma sistemlerinin lehim ergitme amacı ile kullanılabileceğini dolaylı olarak göstermektedir (Çakırca, 2004; Geren vd., 2012).

c. Tamir Sonrası MK Temizliği: Tamir sonrası lehim pastası artıkları ve yabancı maddeler, daha sonra ortaya çıkabilecek problemleri (korozyon vb.) ortadan kaldırmak için mutlaka temizlenmelidir.

Sonuç

Yakın zamanda YM ızgara dizimli (BGA, CSP, QFP ve FCs vb.) devre eleman paketlerinin kullanımına geçilmesi ile birlikte yeni nesil YM elemanların kullanımı, MK tamirinde klasik yöntem ve ekipmanların kullanımına imkân vermediği gibi tamiri yönlendiren bilgi ve gereksinimler de oldukça değişmiştir. Buna bağlı olarak yeni nesil paketler içeren MK tamiri ile ilgili ulusal bilgi birikimi de yetersiz düzeyde kalmıştır. Bu konuda yapılan literatür taraması sonuçları konu üzerinde yapılan çalışmaların yetersiz olduğunu göstermektedir. Buna karşın ulusal ticari ve savunma sanayimiz, savunma sistemleri üretimi ve geliştirilmesi konusunda kayda değer projeler geliştirmektedir. Savunma projelerinin bir kısmı elektronik kontrol sistemlerini de içermektedir. Bu sistemlerde kullanılan yeni nesil paket tipleri hem imalat sürecinde hem de kullanım sürecinde mutlaka tamir

gerektirecektir. Ayrıca, yurt içi ve dışından tedarik edilen savunma sistemlerinin elektronik ekipmanları operasyonlar esnasında arızalanabilmektedir. Bu ürünlerin hurdaya ayrılması stratejik açıdan anlamlı değildir. Bu çalışmada hem geleneksel hem de yeni nesil YM EDE için genel tamir süreçleri ayrı ayrı oluşturularak verilmiştir.

Yeni nesil YM EDE'nin başarıyla tamirinin yapılmasında bütün tamir işlem basamakları aynı öneme sahip olmalarına rağmen, tamirin en önemli işlem basamaklarının, EDE sökme ve lehimleme için gerekli olan lehim ertitme, lehim pastası ve lehim seçimi olduğu gösterilmiş ve süreç içinde dikkat edilmesi gereken noktalar ortaya çıkarılmıştır.

Fonksiyonunu yitiren hatalı YM EDE'nin yenisi ile değiştirilmesi sürecinde kullanılacak ısı kaynağının seçimi lehim ertitme ve tekrar lehimleme esnasındaki termal gereksinimlere bağlıdır. Yeni nesil YM EDE'nin tümü için termal gereksinimler dolgu malzemesi ve kurşunsuz lehim uygulamaları da göz önünde bulundurularak dikkatlice tespit edilmesi gerekmektedir.

Elektronik üretimde tamir, üretim ve ürün kullanım sürecinde gereken bir imalat sürecidir. Tamirin gerçek sonucu hemen ortaya çıkmayabilir. MK kendisinden beklenen fonksiyonları ilk testlerde yerine getirebilir. Ancak, tamir esnasında yukarıda bahsedilen hatalardan biri veya birkaçı oluşturulur ise MK üzerindeki EDE'de kalıcı zararlar oluşur. Buna bağlı olarak da kartın güvenilirliği azalır. Bu nedenle çalışmanın içeriği öncelikle MK'da YM (paket) teknoloji kullanan kuruluşların ve elektronik bakım/onarım teknik ekibinin MK tamir süreçlerinin yapılandırılmasına katkı sağlayacaktır. Ayrıca ve daha önemlisi hem BDK montajı hem de YM EDE içeren BDK tamirini aynı imalat hücresi içinde otonom olarak yürüten robotik esnek üretim sistemleri yurtdışında geliştirilmiştir. Bu çalışmanın çıktıları da yeni nesil YM MK tamirini otonom olarak yapabilecek robotik (esnek) üretim sistemlerinin geliştirilebilmesi için kullanılabilir, çünkü bu çıktılar gerekli süreçleri ve etkili faktörlerin önemli bir kısmını vermektedir. Bu nedenle çalışmanın çıktıları ürün-makine ilişkisi kurulması için belirleyici bir başlangıç oluşturabilir.

Extended Summary

Assembling of printed circuit boards involves a multitude of component parts and a series of interdependent and sometimes repetitive assembly processes.

Therefore, it is a complicated and defect-prone process. Electronic companies' rework rates are between 10% and 30% per cent and often add an additional cost of between 5% and 25% per cent.

There is an increasing need of national knowledge for manufacturing technologies of defence products. Electronic production technologies including printed circuit board (PCB) assembly (PCBA) remanufacturing (rework) is one of these technologies. PCBA rework technology aims to replace a defected component economically in electronic equipment without adversely affecting the overall performance, function and reliability of PCBAs. However, national embedded knowledge on the subject has been insufficient for new generation surface mount components (SMCs). In contrast to this, our national commercial and defence industries get involved with remarkable projects requiring electronic products very recently. The disposal of a malfunctioning PCBA only for a defected component(s) is prohibitive.

The tendency to decrease the size of electronic packages with higher-density I/Os is obvious, which leads to the use of quad flat pack (QFP), area array packaging like Ball Grid Arrays (BGAs) and Chip Scale Packages (CSPs). The use of these new generation components completely changed and complicated the repair process of PCBAs. Incomplete and faulty applications during the repair process may result in the loss of national resources by completely disabling the products. In addition, failure of PCBAs in equipment during military operations can create life-threatening or undesirable consequences.

The purpose of this study is to review the rework or repair procedure of PCBAs. It provides generic rework procedure and rework procedure for new generation packages. Then it discusses the most important steps and factors effective in each step of the new generation surface mount components (SMCs). The main intention is to contribute to national knowledge growth, needed particularly for electronic production of defence industry.

Basically, repair process of new generation SMCs is similar to the traditional SMCs such as, the removal of defective component, cleaning of the surface, application of new solder cream and the new component placement and soldering. The main difference is the filling material between component and PCB, which creates a number of new problems that need to be identified and resolved. However, rework process of area array packages is more tedious and requires reasonably

different process steps. The paper provides the rework procedures for area array packages requiring no-flow under-fill and for conventional SMC with capillary flow.

Replacing defective components contains many factors that reduce the reliability of PCBA. The quality of the solder bond depends on two factors; first is the choice of metallurgically suitable solder and the other is metal surface cleaning quality which is performed by flux. The use of flux is essential during the rework to remove metal oxides on the connections for better wetting and soldering of the joints.

Before the replacement of new SMC (excluding BGA and CSPs), solder cream is applied to previously cleaned pads. Flux is also the most important component of the cream-solder. The solder cream is to contain the same type of flux that is used during the fluxing. Whereas, the solder ball is used for the repair of area array packages instead of the solder cream containing the flux. Therefore, the area array component repair process differs from all-new generation SMCs. Generally, the solder melting temperature and process varies depending on the tin/lead ratio. The options for the correct choice of flux are also discussed in detail according to the solder and PCBA types.

Both preheating and heating are very important steps of the rework. Preheating should be applied locally or to the entire PCBA to protect PCBA and component from the thermal shock as much as possible. In the high temperature phase of repair, the temperature gradient of PCBA is also important for the reliability of PCBA. Temperature gradients for both of these processes are provided. In addition to that the importance of solder reflow systems, which should provide the best effective local heating without disturbing and heating adjacent components such as laser, focused infra-red (IR) and directed hot air reflow systems, is suggested.

After the soldering, the solder cooling step takes place. The rate of cooling directly determines the solder grain size and consequently, the thermal cycle life of the PCBA is affected. The importance of this is also discussed.

Almost all projects contain electronic control systems in defence products. The types of SM packages used in these systems will necessitate repair both in the manufacturing and during the service use. The scrapping of these products is not strategically meaningful. If the techniques, procedures, and effective factors that are given this work are considered, the rework of PCBAs can be performed successfully. In addition, the fundamental knowledge required to establish the product-machine relationship for a development of autonomous PCB repair systems is being made available to the national industry.

Kaynakça

Kitaplar

- Ahlhelm, N. (2013). *An Introduction to High Reliability Soldering and Circuit Board Repair*, ISBN: 1453657460 / 9781453657461.
- Blackwell, G. R., (2000). *Surface Mount Technology, The Electronic Packaging Handbook*, Ed. Blackwell G. R., Boca Raton: CRC Press LLC.
- Bogatin, E., Potter D., Peters L., (1997). *Roadmaps of packaging technology*, chp 10, ISBN-10: 1877750611. http://smithsonianchips.si.edu/ice/cd/PKG_BK/CHAPT_10.PDF.
- Cluff, K.D., ve Pecht M.G., (2001). *Electronic Packaging Technologies, Mechanical Engineering Handbook*, Ed. Kreith F., Boca Raton: CRC Press LLC.
- Geren, N., (2001). Model Based Flexible PCBA Rework Cell Design, *Computer-Aided Design, Engineering and Manufacturing Systems Techniques and Applications*. Vol V. The Design of Manufacturing Systems, Editor Cornelius Leondes, Chapter 6, p.1-44 ISBN. 0-8493-0997-2.
- Lee, N.C. (2002). *Reflow Soldering Processes and Troubleshooting SMT, BGA, CSP, and Flip Chip Technologies*, Butterworth-Heinemann, Boston, MA.
- Licari, J.J. ve Swanson D.W. (2011). *Adhesives Technology for Electronic Applications* (Second Edition), <https://doi.org/10.1016/B978-081551513-5.50006-1>.
- Schwartz, Mel M. (2014). *Soldering: Understanding Basics*, ASM International, The materials Information Society. ISBN 9781627080583.
- Suhir, E., Lee Y.C., ve Wong C.P. (2007). *Micro- and Opto-Electronic Materials and Structures: Physics, Mechanics, Design, Reliability, Packaging: Volume I Materials Physics - Materials Mechanics. Volume II Physical Design - Reliability and Packaging*, Springer Science & Business Media, 1460 sayfa.
- Tong, Ho-M, Lai Yi-S, ve Wong C.P. (2013). *Advanced Flip Chip Packaging*, Springer ISBN 978-1-4419-5767-2.

Makaleler

- Beckett, P.M., Fleming A.R., Gilbert J.M., ve Whitehead D.G. (2002). The Finite Element Modeling of Laser Soldering for Electronic Assemblies, *Int. Journal*

- of Numerical Modeling: Electronic Networks, Devices and Fields*, 15(1), 265–281.
- Chan, Y. C., Tu P. L., ve Hung K. C. (2001). Study of The Self Alignment of No-Flow Underfill for Micro-BGA Assembly, *Microelectronics Reliability*, 1867-1875.
- Chennagiri, G., Iyer S. S., ve Srihari, K. H. (2011). Rework of Lead-Free Area Array Packages Assembled on Ultrathin Flexible Substrates, *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, 1(4), 611-621.
- Çakırca, M. (2004). Alternative proposals for automating rework of advanced surface mount components, *Çukurova University Institute of Natural and Applied Sciences*, Department of Mechanical Engineering, Adana.
- Çelik, M. ve Genç C. (2010). Baskı devre kart elemanlarının mekanik yorulma ve hassasiyet analizleri, *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Dergisi*. 25(1), 27-38.
- Demircan, T. ve Özdemir, E. (2019). Askerî Sistemlerin Yüksek Sıcaklıklara Çıkan Devre Elemanlarının Etkin Olarak Soğutulması, *Savunma Bilimleri Dergisi*, 18(1). ISSN (Basılı): 1303-6831 ISSN (Online): 2148-1776.
- Du, J. (2018). Reliability Analysis for High-Density PCA after Multiple BGA Reworks, 2018 3rd International Conference on System Reliability and Safety (ICRSRS).
- Fidan, I., Kraft, R., Ruff, L. ve Derby, S. (1998). Integration steps of a fully-automated remanufacturing cell system used for fine-pitch surface mounted devices, *IEEE Transactions on Components Packaging and Manufacturing Technology, Part A*, 21(1), 71-78.
- Foster, A.W. (2019). Predicting Solder Defects in Printed Circuit Board Assembly (PCBA) Process, Massachusetts Institute of Technology, Master Thesis.
- Geren, N., Chan, C. ve LO, E. (1992). Computer-Integrated Automatic PCBA Rework, *Integrated Manufacturing Systems*, 3(4), 38-43, DOI:10.1108/09576069210018943.
- Geren, N. ve Redford, A.H. (1994). The Significance of Desoldering and Resoldering Methods in Robotic Automated Rework, *Journal of Electronics Manufacturing*, 4(1), 41-51.
- Geren, N. ve Redford, A. H. (1996). Automated Rework of Printed Circuit Board Assemblies: Methods and Procedures, *Int. Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 9(1), 48-60.

- Geren, N. (2003). Determination and Comparison of Surface Mount Component Rework Cycle Times of Manual and Fully Automated Robotic Rework Stations for Rework Technology Selection, *IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing*, 26(2), 123-132.
- Geren, N., Çakırca, M. ve Bayramoğlu, M. (2006). Design of a flexible assembly and remanufacturing cell for advanced SM components: selection of cell design concept based on reflow tools, *Soldering & Surface Mount Technology*, 18(1), 29-43.
- Geren, N., Sarıgül, Ç. ve Bayramoğlu, M. (2011). Systematic mechanical design approach for a flexible printed circuit board assemblies (PCBA) rework cell: part I – generic mechanical design procedure, *Soldering and Surface Mount Technology*, 23(4), 244-256.
- Geren, N., Sarıgül, Ç. ve Bayramoğlu, M. (2012). Systematic mechanical design approach for a flexible printed circuit board assemblies (PCBA) rework cell: part II - conceptual design of soldering and desoldering system, *Soldering and Surface Mount Technology*, 24(3), 151 - 166. DOI: 10.1108/09540911211244313.
- Ghaffarian, R. (2003). Technology Readiness Overview: Ball Grid Array and Chip Scale Packaging, Nasa Electronic parts and packaging program (NEPP), <http://nepp.nasa.gov>.
- Gowda, A., Srihari K. ve Primavera A. (2001). Lead-Free Rework Process for Chip Scale Packages, Proceedings of the Advanced Packaging Technology Conference, July, 8p. published 6/12/2001.
- Gowda, A., Primavera, A., Rampurawala, M., ve Srihari, K. (2002). Rework and Reliability of Underfilled CSP Assemblies, Proceedings of the IEEE Electronic Components and Technology Conference, pp.458-466.
- Grosshardt, O., Nagy, B. Á ve Laetsch, A. (2019). Applying microscopic analytic techniques for failure analysis in electronic assemblies. *Applied Microscopy*, 49(7), <https://doi.org/10.1186/s42649-019-0009-1>.
- Horsley, R. M., Ekere, N. N. ve Salam, B. (2002). Effect of Lead-Free BGA Rework on Joint Microstructure and Intermetallic Compound Formation, Proceedings of the IEEE Electronic Components and Technology Conference, 1497-1501.
- IPC Roadmap, (2000). A Guide for Assembly of Lead-Free Electronics, Draft IV, June.

- IPC (2011). IPC-7711B/7721B Change 1 November 1, 2011 Rework, Modification and Repair of Electronic Assemblies.
- Isaacs, P., Chia, K. L., Poh H. I. ve Truman, T. (2017). Process considerations for lead free assemblies, Pan Pacific Microelectronics Symposium (Pan Pacific), Kauai, HI, 1-8.
- Jun, W., Ping, H. ve Fei, X. (2004). The effect of residual stress on the flexing strength of PCB assembly, High Density Microsystem Design and Packaging and Component Failure Analysis, HDP '04. Proceedings of the Sixth IEEE CPMT Conference on, 30 June-3 July, 146-50.
- Lau, Chun-Sean, Abdullah M.Z., ve Ani C. F. (2012). Computational fluid dynamic and thermal analysis for BGA assembly during forced convection reflow soldering process, *Soldering & Surface Mount Technology*, 24(2), 77-91, <https://doi.org/10.1108/09540911211214659>.
- Lau, Chun-Sean, Khor, C., Soares, D., Teixeira, J. ve Abdullah, M. (2016). Thermo-mechanical challenges of reflowed lead-free solder joints in surface mount components: a review, *Soldering & Surface Mount Technology*, 28(2), 41-62. <https://doi.org/10.1108/SSMT-10-2015-0032>.
- Li, W. ve Sun, X. (2017). An analysis case on the failure of BGA solder joints, 18th International Conference on Electronic Packaging Technology (ICEPT), Harbin, 731-734.
- Liu, D., Chen T., Yuan, Y., Lu, Y.F., Hong, M. ve Goh, R. (2002). Laser Reflow Plastic Ball Grid Array, Proceedings of the SPIE - The 2nd Int. Symp. on Laser Precision Microfabrication, vol. 4426, 363-366.
- Loctite, (2000). Loctite launches the first commercially available reworkable underfill, *Soldering & Surface Mount Technology*, 12(2), <https://doi.org/10.1108/ssmt.2000.21912bad.005>.
- Naugler, D. (2002). Area Array Rework-Size Does Matter, *Circuits Assembly*, July, 36-40.
- Nguty, T.A., Ekere, N. N., Philpott, J. D. ve Jones G. D. (2000). Rework of CSP: The Effect on Surface Intermetallic Growth, *Soldering & Surface Mount Technology*, 35-38.
- Philpott, J.D., Nguty, T.A., Ekere, N.N. ve Jones G. D. (1999). Effect of CSP Rework on Surface Intermetallic Growth, Proceedings of the IEEE/CPMT Int. Electronics Manufacturing Tech. Symp., 141-147.

- Primavera, A. (1999). Influence of PCB Parameters on Chip Scale Package Assembly and Reliability-Part I, Proceedings of the 12th SMTA International, San Jose, California, September, 13p.
- Rupprecht, H. (2002). Array Package Rework—Lead Free Throws a Curve, *Circuits Assembly*, July, 30-34.
- Russell, E. (1999). A Total Flip Chip Rework Procedure, *Circuits Assembly*, July, 28-30.
- Sriperumbudur, S. S. (2016). Effects of solder paste volume on PCBA yield and reliability, Master Thesis, Department of Manufacturing and Mechanical Engineering Technology, College of Applied Science and Technology, Rochester Institute of Technology, Rochester, NY, May, 2016.
- Su, Y.Y., Srihari, K. ve Emerson, C. R. (1997). A Profile Identification System for Surface Mount Printed Circuit Board Assembly, Proceedings of the 21st Int. Conf. on Computers and Industrial Engineering, 33(1-2), 377-380.
- Tsai, T.N. (2009). Modeling and optimization of reflow thermal profiling operation: a comparative study, *Journal of the Chinese Institute of Industrial Engineers*, 26(1), 480-92.
- Tsenev, V. (2019). Post Reflow Repair Technology with Automatic SMD Assembly for Big Volume of Products, 2019 X National Conference with International Participation (ELECTRONICA), Sofia, Bulgaria, 1-4.
- Tu, P.L., Chan, Y.C. ve Hung, K. C. (2001). Reliability of microBGA Assembly Using No-Flow Underfill, *Microelectronics Reliability*, 1993-2000.
- Wang, L. ve Wong, C. P. (2000). Recent Advances in Underfill Technology for Flip Chip, Ball Grid Array, and Chip Scale Package Applications, Proceedings of the IEEE Int. Symp. on Electronic Materials & Packaging, 224-231.
- Wong, C. P., Wang, L. ve Shi, S. H. (1999). Novel High Performance No Flow and Reworkable Under fills for Flip-Chip Applications, *Mat. Res. Innovat*, 2(1), 232–247.
- Wood, P. (2003). Rework with Lead-Free Solders, *Circuits Assembly*, August, 18-21.
- Wölflick, P. ve Feldmann, K. (2002). Lead Free Low Cost Flip Chip Process Chain: Layout, Process, Reliability, Proceedings of the SEMI/IEEE West, Int. Electronics Manufacturing Technology (IEMT) Symposium, 27-34.

- Xie, D., Hai, J., Wu, Z. ve Economou, M. (2019). Solder Joint Reliability of Double-Side Mounted DDR Modules for Consumer and Automotive Applications, 2019 IEEE 69th Electronic Components and Technology Conference (ECTC), Las Vegas, NV, USA, pp. 486-492.
- Yang, L., Bernstein, J. B. ve Chung, K. (2001). The Impact of Lead-Free Soldering on Electronics Packages, *Microelectronics International*, 20-26.
- Yu, H. ve Shangquan, D. (2013). Solidification and reliability of lead-free solder interconnection, *Soldering & Surface Mount Technology*, 25(1), 31-38. <https://doi.org/10.1108/09540911311294632>.
- Yunus, M., Srihari, K., Pitarresi, J. M. ve Primavera, A., (2003). Effect of Voids on the Reliability of BGA/CSP Solder Joints, *Microelectronics Reliability*, 43(1), 2077–2086.

Web Sitesi

- Circuit TC (2019). <http://www.circuitrework.com/guides/7-1-1.shtml>, 18.09.2019 tarihinde erişildi.
- Czaplicki, B. (2013). Advanced Rework Technology and Processes for Next Generation Large Area Arrays, 01005, PoP and QFN Devices, Circuit Technology, September 23, <http://circuittechnology.com/blog/airvac-rework-technology-2/>.
- Henkel web (2019). 5 Eylül 2019'da https://www.henkel-adhesives.com/sg/en/product/encapsulants/loctite_eccobonduf3800.html adresinden alınmıştır.
- Instructables web (2019). 6 Eylül 2019'da, <https://www.instructables.com/id/Simple-BGA-Reballing/> adresinden alınmıştır.
- Intel (2007). 16 Eylül 2019'da Intel Packaging Databook, 9-Board Reflow process Recommendations, Revised 2007. <https://www.intel.com/content/www/us/en/processors/packaging-chapter-09-databook.html> adresinden alınmıştır.
- Intel Guide (2016). SMT Board Assembly Process Recommendations, Intel Manufacturing Enabling Guide March 2016, <https://www.intel.com/content/dam/www/public/us/en/documents/guides/ch2-smt-board-assembly-process-recommendations-guide.pdf>

Johnson, R. W., Strickland M. ve Gerke D., (2005), 3-D Packaging: A Technology Review, June 23, 19 Eylül 2019'da https://nepp.nasa.gov/files/16285/05_037a%20Johnson%203D%20Packaging%20Report%20071805.pdf adresinden alınmıştır.