

Zależność parametrów profilu temperaturowego w czasie procesu naprawy od wymiarów układów BGA i rodzaju zastosowanego spoiwa lutowniczego

Piotr Witkowski

Politechnika Opolska, Wydział Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki, Instytut Elektroenergetyki i Energii Odnawialnej, ul. Próżkowska 76, 45-758 Opole

Streszczenie: W artykule przedstawiono, jak podczas prac naprawczych (rework) dostosować profil temperaturowy procesu odlutowania i ponownego wlutowania układów BGA (Ball Grid Array) na płytę obwodu drukowanego do wymiarów obudowy układów oraz rodzaju zastosowanego spoiwa lutowniczego. Do testów zastosowano układy BGA w obudowach dwóch wielkości oraz dwa rodzaje spoiw lutowniczych: cynowo-ołowiowe oraz bezołowiowe. Testy zostały wykonane z wykorzystaniem stacji naprawczej dla układów BGA typu Jovy RE-7500. Wyniki testów mogą być przydatne dla techników pracujących w elektronicznych zakładach serwisowych.

Słowa kluczowe: BGA, lutowanie bezołowiowe, stacja lutownicza, unijna dyrektywa RoHS

1. Wprowadzenie

W dniu 1 lipca 2006 r. została wprowadzona na terenie państw członkowskich Unii Europejskiej dyrektywa RoHS I (ang. *Restriction of Hazardous Substances*) Parlamentu Europejskiego i Rady Europejskiej 2002/95/EC, która ograniczała stosowanie niektórych niebezpiecznych substancji w sprzęcie elektrycznym i elektronicznym [1]. Ograniczenia obejmowały stosowanie ołowiu, rtęci, kadmu, sześciowartościowego chromu, polibromowanych bifenyli oznaczonych symbolem PBB oraz polibromowanych eterów difenylowych oznaczonych symbolem PBDE. Celem wprowadzania ograniczeń była poprawa ochrony zdrowia ludzi i ochrona środowiska naturalnego. Dyrektywa RoHS I została w 2013 r. uzupełniona przez dyrektywę RoHS II, która m.in. wprowadza dodatkowo zakaz stosowania różnego typu ftalanów i rozszerza zakres stosowania dyrektywy na urządzenia medyczne.

Wprowadzenie dyrektywy RoHS I wywołało „rewolucję” w przemyśle elektronicznym, ponieważ wymuszało wycofanie ołowiu jako składnika stopów lutowniczych. Stosowane dotychczas w przemyśle elektronicznym stopy lutownicze były stopami cynowo-ołowiowymi. Najpopularniejszy z nich Sn63Pb37 zawierał 63% cyny i 37% ołowiu i charakteryzował się temperaturą

topnienia 183 °C. W nowych, bezołowiowych stopach lutowniczych ołów został zastąpiony przez metale takie jak srebro (Ag), miedź (Cu), bizmut (Bi), antymon (Sb), ind (In), cynk (Zn) i inne [2]. Stopy lutownicze bezołowiowe charakteryzują się wyższą temperaturą topnienia o około 40 °C w porównaniu do stopów ołowiowych oraz gorszą zwilżalnością powierzchni lutowanych. Jednym z najczęściej stosowanych stopów bezołowiowych jest stop SAC305, który zawiera 96,5% cyny, 3% srebra oraz 0,5% miedzi i charakteryzuje się temperaturą topnienia 217 °C. Innym popularnym stopem bezołowiowym jest CASTIN, który zawiera 96,2% cyny, 2,5% srebra oraz 0,8% miedzi i 0,5% antymonu i charakteryzuje się temperaturą topnienia 216–222 °C. Dyrektywa RoHS wymusiła konieczność opracowania nowych materiałów lutowniczych – nie tylko stopów lutowniczych, ale również topników, pokryć pól lutowniczych na płytkach obwodu drukowanego i pokryć wyprowadzeń elementów. Nowe stopy lutownicze bezołowiowe były w ostatnim czasie przedmiotem około 344 zgłoszeń patentowych [3]. Bezołowiowe stopy lutownicze muszą być stosowane w montażu układów elektronicznych eksportowanych na rynki krajów Unii Europejskiej. Dyrektywa RoHS dopuszcza stosowanie stopów ołowiowych jedynie do naprawy urządzeń elektronicznych, wprowadzonych na rynek przed wejściem w życie ustawy RoHS I.

Układy scalone w obudowach BGA (ang. *Ball Grid Array*) są układami z matrycą wyprowadzeń kulkowych na spodzie obudowy. Zaletą układów w obudowach BGA jest zwiększenie gęstości wyprowadzeń, łatwość montażu i większa jego niezawodność, a także zmniejszenie pasożytniczych indukcyjności i pojemności w obrębie układu ze względu na brak połączeń drutowych [4]. Natomiast istotną wadą jest trudna diagnostyka uszkodzeń wymagająca stosowania urządzeń rentgenowskich oraz trudny proces naprawczy (*rework*). Proces naprawczy układów BGA wymaga zastosowania specjalistycznej stacji naprawczej

Autor korespondujący:

Piotr Witkowski: piotr.witkowski@doktorant.po.edu.pl

Artykuł recenzowany

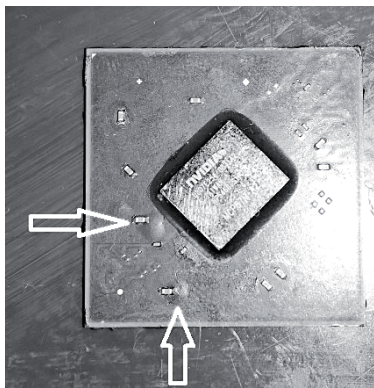
nadesłany 30.11.2018 r., przyjęty do druku 31.12.2018 r.



Zezwala się na korzystanie z artykułu na warunkach licencji Creative Commons Uznanie autorstwa 3.0

z systemem podgrzewania płyty obwodu drukowanego od dołu i z nadmuchem gorącego powietrza od góry. Proces naprawy polega na podniesieniu układu BGA z płyty obwodu drukowanego, oczyszczeniu spodniej powierzchni układu BGA ze starych kulek, położeniu nowych kulek, oczyszczeniu powierzchni pół kontaktowych płyty obwodu drukowanego, a następnie położeniu na nich układu BGA z wymienionymi kulkami. Proces wlutowywania układu z wymienionymi kulkami na odpowiednie pola lutownicze płyty obwodu drukowanego musi odbywać się wg profilu temperaturowego podanego w karcie katalogowej przez wytwórcę układu BGA lub wyznaczonego doświadczalnie przez technika, który wykonuje prace naprawcze.

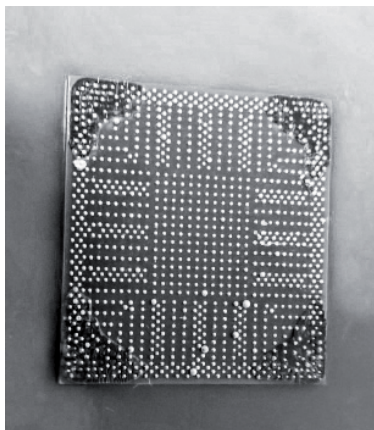
W czasie montażu układów BGA może występować wiele wad lutowniczych takich jak zwarcia między kulkami, zimne luty, pustki w obrębie kulek, niedoloty i inne [5]. W przypadku, gdy układy przed montażem nie są przechowywane w oryginalnych zamkniętych opakowaniach fabrycznych, nasiąkają wilgocią a następnie nie zostają prawidłowo wysuszone przed montażem, występuje w czasie montażu zjawisko pop-corningu czyli rozwarstwienia obudowy (rys. 1).



Rys. 1. Delaminacja układu na skutek nieodpowiedniego osuszenia oraz zbyt gwałtownego wygrzewania
Fig. 1. BGA package delamination due to inadequate drying and too rapid heating

Układy BGA są często montowane na płycie obwodu drukowanego z wykorzystaniem kleju adhezyjnego, który zabezpiecza układ przed naprężeniami mechanicznymi i wstrząsami w czasie użytkowania. Złe dopasowanie współczynników rozszerzalności termicznej kleju i obudowy układu powoduje odrywanie się układu z pół kontaktowych płyty obwodu drukowanego (rys. 2).

Ze względu na wysoką cenę systemów elektronicznych, w których pracują układy scalone w obudowach BGA, w wielu przypadkach jest ekonomicznie uzasadnione podjęcie próby wymiany



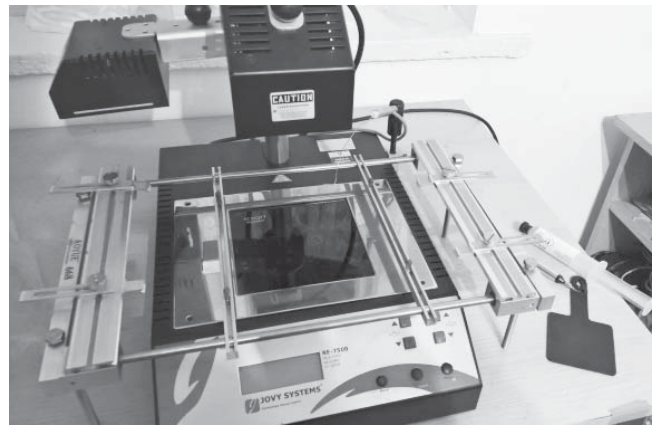
Rys. 2. CPU przystosowany do montażu w technologii BGA z nałożonym przez producenta klejem na rogach układu
Fig. 2. CPU adapted for mounting in BGA technology with glue applied on the corners of the package by the manufacturer

uszkodzonego układu BGA i zastąpienie go układem nieuszkodzonym [6]. W niektórych przypadkach powodem awarii systemu jest uszkodzenie układu scalonego wewnątrz obudowy BGA, ale niekiedy powodem jest erozja spoiwa lutowniczego lub mechaniczne uszkodzenie kulek (oderwanie) na spodzie obudowy. W drugim przypadku ratunkiem jest wymiana spoiwa na spodzie układu BGA.

2. Przebieg eksperymentu

2.1. Stanowisko pomiarowe

Do przeprowadzenia eksperymentu zastosowano stację naprawczą Jovy RE-7500 (rys. 3). Jest to stacja wykorzystująca promienniki podczerwieni do podgrzewania płyty obwodu drukowanego od dołu i od góry oraz zapewnia pełną kontrolę temperatury grzałek górnej i dolnej podczas procesu lutowania rozpliwowego. Można sterować nią z poziomu panelu umieszczonego na pulpicie stacji lub przy pomocy komputera podłączonego do stacji za pomocą portu USB, a także rejestrować profil temperaturowy realizowany przez stację. Wadą stacji jest mała moc grzałki dolnej, przez co czas procesu lutowania jest wydłużony. Dodatkowo wykorzystano chwytak podciśnieniowy umożliwiający precyzyjne usuwanie i umieszczanie układu BGA na płycie obwodu drukowanego oraz stabilną podstawkę do umieszczania na niej gorących układów.



Rys. 3. Zdjęcie stanowiska, na którym wykonano eksperyment przedstawiające stację IR Jovy RE-7500
Fig. 3. Picture of the test stand, showing the Jovy RE-7500 IR station

2.2. Przedmiot eksperymentu

W eksperymencie wykorzystano cztery płyty obwodu drukowanego:

- dwie płyty o wymiarach 210 mm × 265 mm, na których zamontowane były procesory w obudowach BGA o wymiarach 30 mm × 30 mm, na jednej płycie w technologii bezołowiowej (układ testowy 1), na drugiej płycie w technologii ołowiowej (układ testowy 2),
- dwie płyty o wymiarach 245 mm × 270 mm, na których zamontowane były procesory w obudowach BGA o wymiarach 42 mm × 42 mm, na jednej płycie w technologii bezołowiowej (układ testowy 3), na drugiej płycie w technologii bezołowiowej (układ testowy 4).

2.3. Procesy technologiczne

Eksperyment polegał na demontażu układów testowych BGA oznaczonych liczbami 1–4 z płyt obwodu drukowanego, wymianie kulek na spodzie obudów tych układów (ang. *reballing*), a następnie na ponownym położeniu układów BGA na płycie obwodu drukowanego. W czasie procesu wymiany układów BGA rejestrowane były profile temperaturowe procesu lutowania. W procesie lutowania ołowiowego zastosowano spoiwo

Tabela 1. Opis oznaczeń testowanych układów

Table 1. Description of the test BGA package

Oznaczenie układu	Rozmiary obudowy	Technologia lutowania
Układ testowy 1	30 mm × 30 mm	bezołowiowa
Układ testowy 2	30 mm × 30 mm	ołowiowa
Układ testowy 3	42 mm × 42 mm	ołowiowa
Układ testowy 4	42 mm × 42 mm	bezołowiowa

lutownicze Sn63Pb37, a w procesie lutowania bezołowiowego spoiwo lutownicze SAC305.

2.3.1. Demontaż układów testowych BGA z płyt obwodu drukowanego

W czasie demontażu układów testowych BGA z płyt obwodu drukowanego rejestrowano profile temperaturowe procesu lutowania określając temperatury graniczne oraz czas trwania każdej fazy lutowania dla technologii ołowiowej i bezołowiowej. Zarejestrowanie profili temperaturowych w fazie demontażu było ważne, ponieważ te same profile należało zastosować w fazie ponownego montażu układów BGA na płycie obwodu drukowanego.

W profilu temperaturowym lutowania wyróżnia się cztery fazy:

1. Fazę nagrzewania wstępnego (ang. *preheat*), w czasie której następuje powolne nagrzewanie płyty obwodu drukowanego przy temperaturach od 0 °C do 150 °C,
2. Fazę wygrzewania (ang. *soak*), w której następuje wyrównywanie temperatury płyty obwodu drukowanego oraz aktywacja topnika,

3. Fazę rozplywu (ang. *reflow*), w której mają miejsce właściwe przemiany metalurgiczne w połączeniu lutowanym,
4. Fazę chłodzenia (ang. *cooling*), w której następuje stopniowe chłodzenie układu do temperatury 45 °C.

Temperatury graniczne poszczególnych faz, jak i czas trwania tych faz różni się dla lutowania ołowiowego i bezołowiowego, ze względu na różne temperatury topnienia stopów ołowiowych i bezołowiowych.

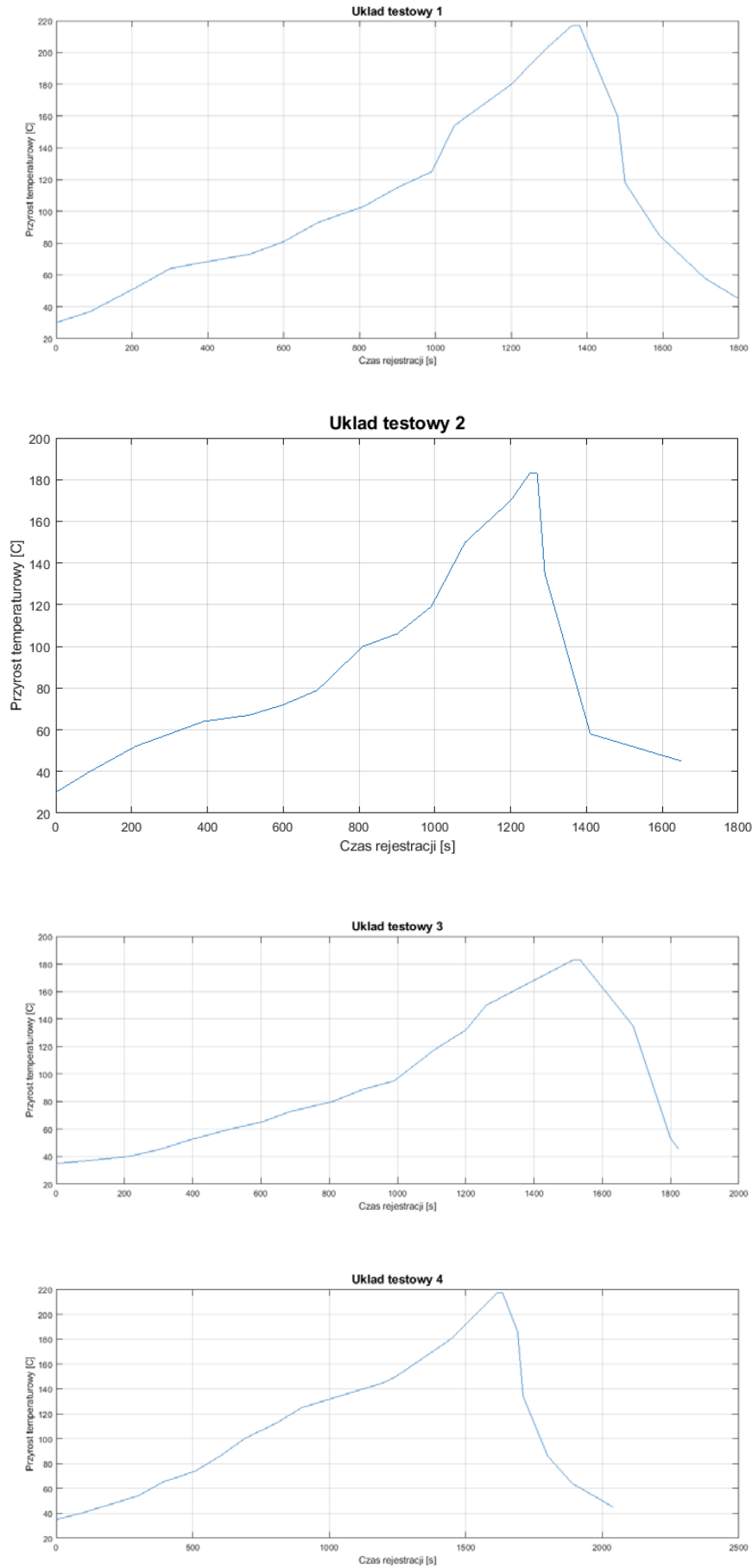
2.3.2. Wymiana kulek – reballing

Po wymontowaniu układów BGA z płyt obwodu drukowanego, wykonano za pomocą plecionki oraz grotu model T-S3 oczyszczenie z pozostałości starego lutowniczego na spodniej części obudów układów BGA oraz pól lutowniczych na płycie obwodu drukowanego. Następnie wysuszono układy BGA w suszarce z nawiewem powietrza w temperaturze 100 °C przez 30 minut i poddano je operacji odtworzenia matrycy kulek na spodniej powierzchni obudów (ang. *reballing*). Wykorzystano komercyjne kulki lutownicze ze stopu ołowiowego Sn63Pb37, które nałożono na specjalne szablony

Tabela 2. Charakterystyka profili temperaturowych dla różnych technik lutowania i wymiarów obudów układów BGA

Table 2. Characteristics of temperature profiles for different soldering techniques and sizes of BGA packaging

Cechy profilu temperaturowego	Technologia ołowiowa		Technologia bezołowiowa	
	Profil 2	Profil 3	Profil 1	Profil 4
	Układ testowy 2 30 mm × 30 mm	Układ testowy 3 40 mm × 40 mm	Układ testowy 1 30 mm × 30 mm	Układ testowy 4 40 mm × 40 mm
Faza nagrzewania wstępnego (Preheat)				
Zakres temperatury	0–150 °C ($\Delta = 150$ °C)	0–150 °C ($\Delta = 150$ °C)	0–150 °C ($\Delta = 150$ °C)	0–150 °C ($\Delta = 150$ °C)
Czas trwania fazy	1080 sek.	1260 sek.	1050 sek.	1245 sek.
Szybkość narastania temperatury	~0,13 °C/s	~0,11 °C/s	~0,14 °C/s	~0,12 °C/s
Faza wygrzewania (Soak)				
Zakres temperatury	150–170 °C ($\Delta = 20$ °C)	150–170 °C ($\Delta = 20$ °C)	150–180 °C ($\Delta = 30$ °C)	150–180 °C ($\Delta = 30$ °C)
Czas trwania fazy	120 sek.	195 sek.	150 sek.	190 sek.
Szybkość narastania temperatury	~0,16 °C/s	~0,10 °C/s	0,2 °C/s	~0,15 °C/s
Faza rozplywu (Reflow)				
Zakres temperatury	170–183 °C ($\Delta = 13$ °C)	170–183 °C ($\Delta = 13$ °C)	180–217 °C ($\Delta = 37$ °C)	180–217 °C ($\Delta = 37$ °C)
Czas trwania fazy	70 sek.	80 sek.	180 sek.	200 sek.
Szybkość narastania temperatury	~0,18 °C/s	~0,16 °C/s	~0,20 °C/s	~0,18 °C/s
Faza chłodzenia Cooling				
Zakres temperatury	183–45 °C ($-\Delta = 138$ °C)	183–45 °C ($-\Delta = 138$ °C)	217–45 °C ($-\Delta = 172$ °C)	217–45 °C ($-\Delta = 172$ °C)
Czas trwania fazy	390 sek.	300 sek.	420 sek.	410 sek.
Szybkość opadania temperatury	~0,35 °C/s	0,46 °C/s	~0,40 °C/s	~0,41 °C/s



Rys. 4. Wizualizacja wykonanych profili temperaturowych w programie MATLAB na podstawie zebranych danych
 Fig. 4. Visualization of the temperature profiles made in Matlab based on the collected data

metalowe dostosowane do wielkości obudów oraz rastru wyprowadzeń.

Po wygrzaniu układów w piecyku do lutowania w temperaturze powyżej temperatury rozplwu lutowia kulek uzyskano przylutowanie nowych kulek do pól lutowniczych układów BGA.

2.3.3. Montaż odnowionych układów BGA na płycie obwodu drukowanego

Układy BGA po reballingu zamontowano ponownie na płytach obwodu drukowanego wykorzystując urządzenie IR Jovy RE-7500 oraz ustalając taki sam profil temperaturowy, jak przy demontażu układów BGA czyli profil ołowiowy dla płyt lutowanych w technologii ołowiowej oraz profil bezołowiowy dla płyt lutowanych w technologii bezołowiowej. Profil ołowiowy i bezołowiowy różnią się temperaturami granicznymi poszczególnych faz, np. temperaturą rozplwu oraz czasem, w którym przebywają układy w poszczególnych fazach.

2.3.4. Wyniki eksperymentu i dyskusja wyników

W czasie ponownego montażu układów BGA na płycie obwodu drukowanego rejestrowano czas przebywania układów w strefach temperaturowych charakterystycznych dla fazy nagrzewania wstępnego, wygrzewania, rozplwu i chłodzenia dla układów BGA o dwóch rozmiarach oraz dwóch technologii lutowania – ołowiowego i bezołowiowego. Wyniki zawiera Tabela 2.

Po wykonaniu eksperymentu na podstawie zebranych danych, nastąpiło opracowanie wizualizacji zastosowanych profili temperaturowych w programie MATLAB. Wizualizację zastosowanych profili przedstawiono na rysunku 4.

Następnie skategoryzowano technologię montażu próbek oraz umieszczono je odpowiednio numerycznie w tabeli 4. Kolejnym krokiem było podzielenie wyników na cztery fazy lutowania. Ustalenie zakresu temperatury panującej w poszczególnej fazie w celu wyliczenia przyrostu „ Δ ”, który na późniejszym etapie został wykorzystany do obliczenia szybkości narastania temperatury w poszczególnej fazie lutowania lub jej opadania w przypadku fazy chłodzenia.

Następnie sprawdzono czas trwania każdej z faz. Znając przyrost „ Δ ” w każdej fazie oraz czas ich trwania, a następnie wykonując operację dzielenia, można było wyliczyć szybkość narastania czy spadku temperatury w danej fazie dzieląc przyrost temperatury przez czas trwania fazy otrzymując wynik w $^{\circ}\text{C}/\text{s}$.

3. Wnioski

W fazach lutowania, kiedy ściągano i chłodzono płytę z osadzonym układem z domieszką ołowiu (Profile nr 2 oraz 3) można zaobserwować krótszy czas lutowania rozplwowego czy chłodzenia, co jest skutkiem osiągnięcia mniejszej temperatury rozplwu w przeciwieństwie do spoiwa bezołowiowego. Dodatkowo niższa temperatura rozplwu korzystnie wpływa na żywotność układu, charakteryzującego się swoją wytrzymałością temperaturową. Z drugiej strony toksyczność ołowiu w połączeniu z nieodpowiednim składowaniem elektroodpadów była główną przyczyną powstania unijnej dyrektywy RoHS. Rodzi się też pytanie, czy coraz częściej stosowane zabiegi przez producentów utrudniające serwis, jak np. stosowanie kleju pod układem, czy połączenia funkcji kilku układów w jeden i ich wysokie ceny na rynku, nie jest przyczyną tworzenia stanu może bardziej przyjaznego środowisku, ale za

to coraz bardziej zwiększając się ilości elektroodpadów, które również gdzieś muszą być składowane.

Patrząc na tabelę, można zwrócić uwagę na długą fazę podgrzewania wstępnego, co wiąże się z niskim przyrostem temperaturowym. Długie i powolne wygrzewanie układów w tej pierwszej fazie zostało celowo zastosowane, aby odpowiednio te układy osuszyć przed rozpoczęciem kolejnych faz. W fazie wygrzewania, która trwała o wiele krócej skupiono się aby aktywować topnik i zastosowano również powolne wygrzewanie z nieco większym przyrostem, choć jak pokazuje profil nr 3 tam występujący przyrost był nawet mniejszy, co w zasadzie nie jest błędem. Obserwując przebiegi w czasie trwania tej fazy często można spotkać się z zatrzymaniem temperatury na tym etapie lutowania. Tutaj tej konieczności nie było, gdyż przyrost temperaturowy był bardzo niski. Wynika to ze specyfikacji eksperymentu, gdyż przedstawiał warunki serwisowe gdzie czas i zapotrzebowanie nie jest tak kluczowe jak w warunkach produkcyjnych. Ponadto nie chodzi w tej fazie o gwałtowne wygrzanie, a aktywację topnika, oczyszczenie spoiwa i przygotowanie go do osiągnięcia temperatury rozplwu. Wyraźny przyrost temperaturowy jest widoczny w fazie lutowania właściwego (reflow), kiedy nastąpiło zwiększenie mocy grzałki. Temperatura do 170°C dla cyny z domieszką ołowiu czy 180°C dla profilu bezołowiowego, jest temperaturą kiedy bezpiecznie można podnieść moc grzałki do maksimum, a jeżeli układ został odpowiednio osuszony w pierwszej fazie nie powinno dojść do delaminacji. Innymi czynnikami, które miały wpływ na niski przyrost temperatury są: specyfikacja stacji, różnice powierzchni układu, czy płyty pcb, co wyraźnie obrazuje tabela. Faza chłodzenia również jest ważną fazą i powinna rozpocząć się po ściągnięciu układu z płyty, aby zapobiec uszkodzeniom, jak delaminacja czy odkształcenia na skutek przegrzania. Faza ta powinna trwać do osiągnięcia temperatury 45°C .

Reasumując, technik przystępując do pracy związanej z lutowaniem układów BGA powinien zapoznać się z zastosowanym rodzajem spoiwa, gdyż ma to związek z temperaturami działającymi na układ, z powierzchnią układu jak i z płytą obwodu drukowanego, gdyż odprowadzanie ciepła przez płytę wpływa na przyrost temperatury, a duża powierzchnia układu utrudnia osiągnięcie temperatury rozplwu spoiwa. Należy stosować profil działaniami uwzględniając: powolne osuszenie w pierwszej fazie lutowania rozplwowego celem uniknięcia delaminacji, aktywację topnika w drugiej fazie oraz odpowiednie dostosowanie temperatury rozplwu w trzeciej fazie, celem uniknięcia nadmiernego przegrzania układu.

Bibliografia

1. Directive 2002/95/EC of The European Parliament and of the Council of 27 January 2003, On the restriction of the use of certain hazardous substances in electric al and electronic equipment.
2. Friedel K., *Bezołowiowe technologie montażu elementów elektronicznych na płytkach obwodów drukowanych*, „Elektronika: konstrukcje, technologie, zastosowania”, Vol. 46, Nr 9, 32–34, Wydawnictwo: Sigma-NOT, 2005.
3. Bukat K., Hackiewicz H., *Lutowanie bezołowiowe*, ISBN: 978-8-3602-3325-2, Wydawnictwo: BTC, Warszawa 2007
4. Intel® Information Packaging Databook, Chapter 14, “Ball Grid Array (BGA) Packaging”, www.intel.com/design/packtech/ch_14.pdf.

5. Dziurdzia B., *Ball Grid Array failure diagnosis*, „Elektronika: konstrukcje, technologie, zastosowania”, Vol. 52, Nr 3, 61–65, Wydawnictwo: Sigma-NOT, 2011
6. Janicki K., *Lista wadliwych układów BGA – zestawienie 2014*, <https://expressit.pl/porady-komputerowe/lista-wadliwych-ukladow-bga-ati-oraz-lista-wadliwych-ukladow-bga-nvidia-zestawienie-2014/>.

Dependence of temperature profile parameters during the repair process on the size of BGA package and the type of solder alloy used

Abstract: The article presents how the temperature profile of the process of desoldering and re-soldering of BGA (Ball Grid Array) package to Printed Circuit Board (PCB) to the size of the BGA packaging and the type of solder alloy used should be adjusted during rework. BGA packages in two sizes of packaging and two types of soldering alloys: lead-tin and lead-free were used for testing. The tests were performed using a Jovy RE-7500 repair station. Test results can be useful for technicians working in electronic service centers.

Keywords: BGA, lead-free soldering, soldering station, EU RoHS directive

mgr inż. Piotr Witkowski

piotr.witkowski@doktorant.po.edu.pl

Absolwent Wydziału Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki, Politechniki Opolskiej na kierunku Informatyka. W latach 2017–2019 właściciel serwisu zajmującego się naprawą komputerów i elektroniki użytkowej AllByte System w Radomsku. Obecnie doktorant I roku studiów III stopnia na kierunku: Elektrotechnika Wydziału Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki, Politechniki Opolskiej. Zainteresowania naukowe: przetwarzanie sygnałów, informatyka śledcza, obserwacja zjawisk zachodzących podczas procesów związanych z lutowaniem BGA.

