

Научная статья

УДК 621.791.048.5

<https://doi.org/10.35266/1999-7604-2024-3-8>



Анализ влияния шероховатости паяльной маски и формы трафарета на образование пустот в паяных соединениях

Андрей Владимирович Турецкий¹, Александр Александрович Пирогов²,
Ирина Владимировна Свиридова³, Марина Владимировна Хорошайлова⁴,
Элеонора Викторовна Сёмка⁵✉

^{1, 2, 3, 4}Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Россия

⁵Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» Минобороны России, Воронеж, Россия

¹tav7@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5338-367X>

²Pirogov.alx@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-5105-0505>

³ri-ss-ka@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5279-0807>

⁴pmv2205@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9167-9538>

⁵semka_elya@mail.ru ✉, <https://orcid.org/0000-0002-0194-6979>

Аннотация. Проведен анализ причин появления и выявлены пути минимизации пустот, которые образуются внутри паяных соединений. Возникающие в процессе пайки пустоты существенно снижают как механическую, так и электрическую прочность соединения. Кроме того, существенно ухудшается теплопроводность, особенно в корпусах компонентов, где паяное соединение выполняет также роль теплоотвода.

Предложены два новых подхода, ведущих к уменьшению образования пустот в паяных соединениях. Первый подход заключается в изменении шероховатости паяльной маски, влияющей на распределение флюса вокруг контактной площадки. Показано, что большая шероховатость паяльной маски положительно влияет на лучшую растекаемость флюса, выделяющегося при оплавлении припоя. При этом пятно флюса оказывается больше и он меньше попадает в паяное соединение, что приводит к минимизации объема и количества пустот.

Второй подход заключается в нанесении не одного большого пятна паяльной пасты, а нескольких маленьких, разделенных небольшими промежутками. При этом для сохранения объема дозы припоя предложено использовать более толстые трафареты нанесения паяльной пасты. Наличие промежутков между пятнами паяльной пасты способствуют лучшему вытеснению газов, выделяющихся при оплавлении.

Ключевые слова: надежность радиоэлектронных средств, монтаж электронных компонентов, пустоты в паяных соединениях, флюс

Финансирование: работа выполнена в рамках функционирования дизайн-центра «Силовая электроника» ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет».

Для цитирования: Турецкий А. В., Пирогов А. А., Свиридова И. В., Хорошайлова М. В., Сёмка Э. В. Анализ влияния шероховатости паяльной маски и формы трафарета на образование пустот в паяных соединениях // Вестник кибернетики. 2024. Т. 23, № 3. С. 70–81. <https://doi.org/10.35266/1999-7604-2024-3-8>.

Original article

**Analysis of the influence of solder mask roughness and stencil shape
on the formation of voids in solder joints**

**Andrey V. Turetsky¹, Aleksandr A. Pirogov², Irina V. Sviridova³,
Marina V. Khoroshailova⁴, Eleonora V. Syomka⁵**

^{1, 2, 3, 4}Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

⁵Military Educational and Scientific Centre of the Air Force N. E. Zhukovsky and Y. A. Gagarin Air Force Academy the Ministry of Defence of the Russian Federation, Voronezh, Russia

¹tav7@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5338-367X>

²pirogov.alx@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-5105-0505>

³ri-ss-ka@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5279-0807>

⁴pmv2205@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9167-9538>

⁵semka_elya@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0194-6979>

Abstract. The analysis of the causes of occurrence and ways of minimizing voids that are formed inside soldered joints is carried out. Voids that form during soldering significantly reduce both the mechanical and electrical strength of the joint. In addition, thermal conductivity significantly decreases, especially in component housings, where the soldered joint also acts as a heatsink.

We propose two alternative approaches leading to a decrease in the formation of voids in soldered joints. The first approach involves changing the roughness of the solder mask, which affects the distribution of flux around the contact pad. Research shows that a higher roughness of the solder mask positively affects the better spreading of the flux released during solder reflow. Here, the flux spot is larger and less of it gets into the soldered joint, which leads to a minimization of the volume and number of voids.

The second approach includes applying not one large amount of solder paste, but several small ones, separated by small gaps. Moreover, to maintain the volume of the solder dose, it is proposed to use thicker stencils to apply solder paste. The presence of gaps between the spots of solder paste contributes to better displacement of gases released during reflow.

Keywords: reliability of radio-electronic equipment, installation of electronic components, voids in solder joints, flux

Funding: the work is carried out alongside the Educational Design Center for Electronics “Silovaya elektronika” at the Voronezh State Technical University.

For citation: Turetsky A. V., Pirogov A. A., Sviridova I. V., Khoroshailova M. V., Syomka E. V. Analysis of the influence of solder mask roughness and stencil shape on the formation of voids in solder joints. *Proceedings in Cybernetics*. 2024;23(3):70–81. <https://doi.org/10.35266/1999-7604-2024-3-8>.

ВВЕДЕНИЕ

Паяные соединения выполняют несколько функций – электрическую коммутацию компонентов, механическую фиксацию их на печатной плате и теплоотвод. Одним из серьезных дефектов паяных соединений является образование пустот (пустоты, образующиеся внутри соединений). Они оказывают негативное влияние на все типы соединений, упомянутые выше, и, таким образом, способствуют снижению надежности. Исследования показывают, что пустоты в паяных

соединениях существенно снижают механическую прочность соединения [1]. Влияние профиля пайки на пустотообразование и механическую прочность получаемых паяных соединений, при использовании четырех паяльных паст (BiSnAg, SAC305, Sn100C, SnSb) и трех покрытий поверхности печатной платы (ENIG, иммерсионное Ag, иммерсионное Sn), рассматривал N. Zhu [2]. Различные виды пустот припоя оказывают совершенно разное влияние на общий тепловой импеданс корпуса. Большие сросшиеся пусто-

ты оказывают более существенное влияние, чем маленькие распределенные. Длинные теплогенерирующие области/объемы типа полосок, связанные с полупроводниковыми лазерными чипами, приводят к сильной чувствительности к ориентации пустот припоя под ними [3]. Качество поверхности паяльной площадки оказывает большое влияние на качество паяных соединений после оплавления [4]. Микроминиатюризация элементов и создание функционально сложных микроэлектронных устройств и микропроцессоров вызывают особые проблемы в области микромонтажа изделий электроники. Поэтому для повышения надежности функционирования изделий электроники необходимо уменьшить количество и размеры пустот в паяных соединениях.

Цель – разработка технологических методов уменьшения пустот в паяных соединениях компонентов на печатной плате с использованием двух типов флюса, трафаретов разного типа и толщины.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

1. Анализ пустот и их образование в паяных соединениях компонентов на печатной плате

Пустоты можно разделить на несколько групп. К ним относятся микропустоты, макропустоты (внутренние полости), дырчатые пустоты, усадочные пустоты, пустоты Киркендалла и пустоты в микропереходах. Расположение и форма указанных видов пустот показаны на рис. 1.

Однозначного мнения о допустимых размерах макропустот нет. Пустоты диаметром менее 50 мкм называют микропустотами [5].

Макропустоты возникают в результате технологического процесса пайки. Типичный процесс технологии поверхностного монтажа начинается с трафаретной печати, когда паяльная паста наносится на контактные площадки на печатной плате. Процесс печати имеет множество переменных параметров, таких как условия окружающей среды, форма и размеры апертуры отверстий трафарета, текучесть паяльной пасты [6]. Из-за множества

влияющих факторов процесс образования пустот не до конца изучен. В частности, замечено, что недостаточное качество паяльных паст, их грубое раскатывание и заполнение отверстий трафарета могут стать причиной поглощения пузырьков воздуха. Это может привести к плохому осаждению паяльной пасты на печатной плате и дальнейшему образованию пустот при пайке оплавлением. Д. Хе, Н. Н. Экере, М. А. Карри рассмотрели поведение паяльной пасты под действием вибрирующего ракеля для оптимизации параметров процесса [7].

После процесса нанесения паяльной пасты через трафарет следует установка компонентов с помощью автоматической машины. Компоненты вдавливаются в паяльную пасту с усилием, предварительно заданным монтажной головкой. Неправильно установленная сила прижима может привести к изменению формы ранее нанесенной паяльной пасты и, как следствие, к увеличению количества воздушных пузырьков внутри паяльной пасты [8].

После этого печатная плата с установленными компонентами поступает в конвекционную печь, где происходит оплавление паяльной пасты. Многие исследования показали, что образование пустот сильно зависит от параметров пайки, включая зону предварительного нагрева, пиковую температуру и время выдержки [9]. Направление теплового потока

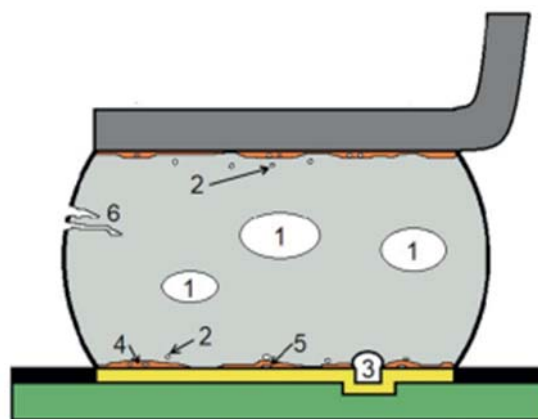


Рис. 1. Расположение различных типов пустот в паяном соединении:

1 – макропустоты; 2 – микропустоты; 3 – пустоты в микропереходах; 4 – пустоты Киркендалла; 5 – дырчатые пустоты; 6 – усадочные пустоты
Примечание: составлено авторами по источнику [5].

и охлаждение также могут оказывать влияние на свойства и структуру получаемых паяных соединений и образование пустот, что было подтверждено в работах [10–12].

Появление пустот вызвано газовойделением флюса и других газов, которые не могут выйти из паяного соединения при оплавлении. Испарение реологических добавок и растворителей из паяльной пасты в процессе нагрева также является источником газовойделения [13].

Еще одним источником образования пустот во время оплавления припоя может быть реакция флюса с металлизацией паяемой детали или с оксидами, присутствующими на поверхностях контактных площадок или в паяльной пасте. Поведение пустот изучалось с использованием печатной платы с микропереходными отверстиями и контактными площадками, компонентов PBGA (пластиковый корпус с матрицей шариковых выводов), а также путем измерения пустот в паяных соединениях [14]. В частности выявлено, что финишное покрытие типа ОЗП (органическое защитное покрытие) способствовало образованию пустот в большей степени, чем ENIG (Ni/Au).

В эксперименте использовались паяльные пасты с флюсами на основе канифоли. Классификация флюсов в соответствии ГОСТ Р МЭК 61190.1-1-2020 приведена в табл. 1 [15].

Стандарт IPC-610 устанавливает критерий приемлемости для пустот: менее 25 % площади на рентгеновском изображении. Паяные соединения являются допустимыми, если размер и количество пустот находятся на низком

уровне, что устраняет потенциальный риск плохого проводящего контакта.

2. Два способа по уменьшению образования пустот в паяных соединениях

Первый способ по уменьшению образования пустот в паяных соединениях основан на идее уменьшения количества флюса, присутствующего в паяном соединении во время фазы жидкого и твердого состояния. Для этого необходим более высокий уровень вывода флюса в окружающую поверхность паяльной площадки, что может быть достигнуто путем изменения равновесия поверхностного натяжения между жидким флюсом, окружающим воздухом и поверхностью паяльной маски. Смачивание и растекание паяльной пасты по контактной площадке в значительной степени зависит от свойств жидкости и поверхности печатной платы, на которую сильно влияет шероховатость паяльной маски. При более шероховатой паяльной маске флюс лучше смачивает окружающую поверхность вокруг контактной площадки, а площадь растекания больше [16]. Это может привести к уменьшению количества флюса в объеме жидкого сплава и, таким образом, снизить вероятность попадания флюса внутрь соединения.

Второй способ заключается в изменении конструкции стального трафарета для нанесения паяльной пасты. Вместо одного отверстия размером с контактную площадку, модифицированный трафарет содержит два или четыре отверстия меньшего размера. С точки зрения сохранения того же объема осажденной пасты, что и для обычного трафарета, модифицированный трафарет сделан толще.

Таблица 1

Классификация флюсов, состав, уровни активности

Флюс	Уровни активности флюса		Обозначение флюса в стандарте МЭК*
Канифоль	Низкий (< 0,01)	L0	ROL0
	Низкий (< 0,15)	L1	ROL1
	Средний (< 0,01)	MO	ROM0
	Средний (0,15–2,0)	M1	ROM1
	Высокий (< 0,01)	HO	ROH0
	Высокий (> 2,0)	H1	ROH1

Примечание: МЭК* – материалы электронных модулей. Составлено авторами по источнику [15].

Такая конструкция должна вызвать более высокую активность растекания и перемещения паяльной пасты по контактной площадке во время процесса расплавления, что способствует вытеснению большего количества пузырьков газа из припоя. Кроме того, такая конструкция создает воздушные зазоры и каналы, через которые частицы газообразного флюса более эффективно удаляются из паяного соединения.

Для оценки паяемости металлов применяются методы, связанные с определением площади или высоты растекшегося припоя по паяемой поверхности. Коэффициент растекания припоя K_p в первом случае определяется как:

$$K_p = \frac{S_p}{S_0}, \quad (1)$$

где S_p и S_0 – соответственно площади растекшегося припоя и его исходной дозы.

Во втором случае K_p может быть определен с помощью отношения:

$$K_p = \frac{D_K - H_K}{D_K}, \quad (2)$$

где D_K – диаметр капли припоя;

H_K – высота капли растекшегося припоя.

Величина D_K определяется из предположения отсутствия влияния силы тяжести исходной дозы припоя:

$$D_K = \sqrt{\frac{6 \cdot m}{\pi \cdot \rho}}, \quad (3)$$

где m – масса дозы припоя;

ρ – плотность припоя в расплавленном состоянии.

Значения коэффициентов растекания припоя, определенные по приведенным выражениям, оказываются различными, поскольку в первом случае:

$$S_p > S_0 \text{ и } K_p > 1, \quad (4)$$

а во втором случае:

$$H_K > D_K \text{ и } K_p < 1. \quad (5)$$

Для проведения эксперимента была разработана специальная печатная плата размером 46 мм × 33 мм. Всего было изготовлено и про-

анализировано 90 плат, по 5 плат для каждой комбинации типа трафарета, паяльной маски и паяльной пасты.

Печатные платы содержали контактные площадки для 20 резисторов типоразмера 2010. Они были разделены на три группы: одна без паяльной маски и две с паяльными масками, различающимися шероховатостью. Одна из них была матовая, а другая – глянцевая. Для обеспечения одинаковой дозы паяльной пасты разработаны несколько трафаретов, так трафарет 1 имеет толщину 0,1 мм, а два других (трафареты 2 и 3) – 0,2 мм (рис. 2).

Это обеспечило нанесение одинакового объема паяльной пасты.

Использовались две паяльные пасты с одинаковым составом припойного сплава, различающиеся по активности флюса. Флюс ROL1 обладает более высокой химической активностью в отношении восстановления оксидов, чем ROL0. Полные параметры паяльных паст, использованных в эксперименте, приведены в табл. 2, где паяльная паста с флюсом ROL1

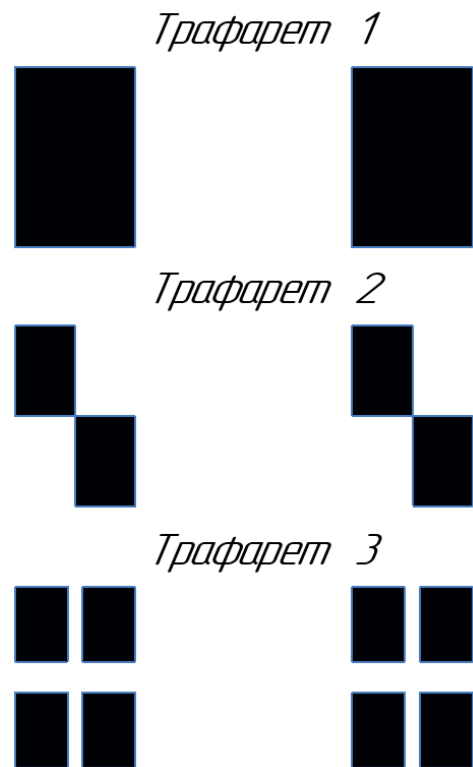


Рис. 2. Тип использованных трафаретов
 Примечание: составлено авторами.

Таблица 2

Параметры используемых паяльных паст

Параметры паст	Паста А	Паста Б
Производитель	AIM	AIM
Тип	Бессвинцовая	Бессвинцовая
Обозначение	M8	NC254
Композиция	Sn96.5Ag3Cu0.5 (SAC305)	Sn96.5Ag3Cu0.5 (SAC305)
Содержание флюса (мас.%)	11,50 %	11,50 %
Тип флюса	Натуральная смола – ROL1	Натуральная смола – ROL0
Галогениды	Br: 0,24 %, Cl: 0,0 %	Нет
Температура плавления	230–245 °C	230–245 °C
Вязкость	500–1000 Kcps	300–900 Kcps
Размер частиц	25–45 мкм	25–45 мкм

Примечание: составлено авторами по источнику [15].

обозначена как «паста А», а паяльная паста с флюсом ROL0 – «паста Б».

Печатные платы подвергались пайке в конвекционной печи с непрерывной подачей воздуха. Температурный профиль был одинаковым для обеих паяльных паст и, следовательно, для всех исследуемых образцов. Температурный профиль, измеренный термопарой, прикрепленной к тестируемой печатной плате, показан на рис. 3. Скорость продвижения платы в печи составляет 300 мм/мин. На термопрофиле прослеживаются несколько зон подогрева платы и одна зона оплавления с температурой 230 °C.

Параметры температурного профиля взяты от рекомендаций производителя припоя, чтобы не искажать результаты исследования.

После пайки получены изображения паяных контактов, на которых яркие пятна представляют собой пустоты в соединении (рис. 4). Из-за ограниченного разрешения изображений были обнаружены только пустоты диаметром более 5 мкм. Пустоты обнаружены с ошибкой измерения менее 0,5 %. Минимальный размер макропустоты был установлен на уровне 100 мкм.

Кроме того, с помощью конфокального микроскопа (OPTO EDU, Китай) была измерена шероховатость использованных паяльных масок. По результатам измерений определены три параметра шероховатости: Ra – средняя высота профиля поверхности; RL0 – развитая длина профиля шероховатости, выраженная в % рас-

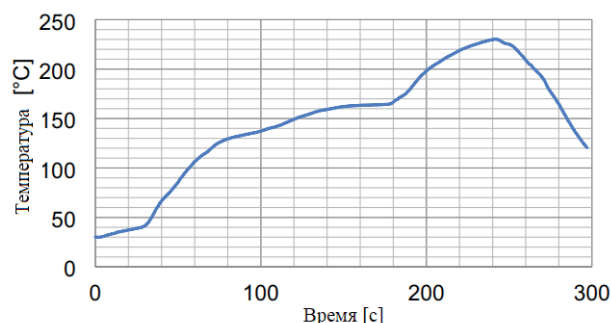


Рис. 3. Температурный режим при оплавлении в печи

Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

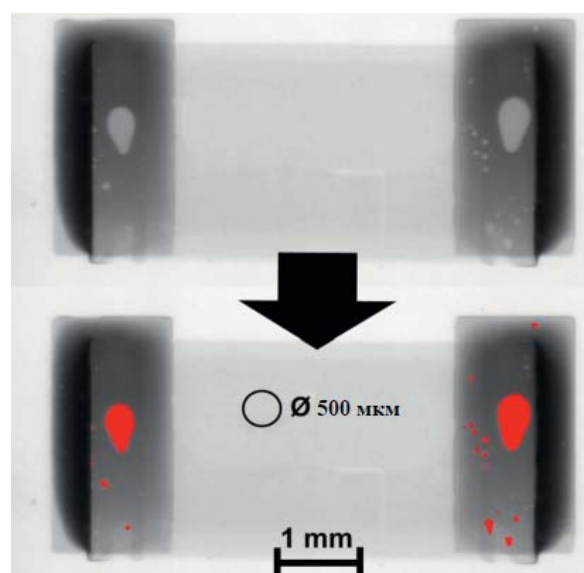


Рис. 4. Исходное рентгеновское изображение и обработанное компьютерное изображение паяных соединений с пустотами, отмеченными красным цветом

Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

ширения над 100 % от гладкого профиля; и R_z – максимальная высота выступов профиля.

В табл. 3 представлены параметры и погрешность измерения шероховатости поверхности испытанных вариантов печатных плат.

Изображение с конфокального микроскопа представлено на рис. 5.

На рис. 5 видна область распространения флюса припоя за пределы паяного соединения и его маркировка.

Таблица 3

Измерение шероховатости используемых паяных масок

Маска для пайки	R_a (мкм)	R_{Lo} (%)	R_z
Без маски	$1,18 \pm 0,03$	141 ± 12	$7,21 \pm 0,05$
Матовая	$1,62 \pm 0,04$	68 ± 7	$1,49 \pm 0,05$
Глянцев	$0,18 \pm 0,02$	21 ± 2	$0,73 \pm 0,03$

Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для уменьшения количества пустот предложены два новых способа, ведущие к уменьшению образования пустот в паяных соединениях. На рис. 6 представлена оценка площади распространения флюса вокруг паяльных площадок.

В результате эксперимента выявлено, что при первом способе уменьшения пустот (изменение шероховатости поверхности печатной платы) большая площадь распространения припоя приводит к уменьшению уровня пустот внутри соединения (рис. 6).

Рентгеновская съемка ряда макровыступов в паяных соединениях показала соотношения между общей площадью пустот и площадью макровыступов, а также их влияние на общую площадь пустот. Общие результаты средней площади макропористости в паяных соединениях в испытанных образцах в процентах от площади паяного соединения показаны на рис. 7.

Микропустоты составляют лишь минимальную часть пустот, и их количество практически одинаково (в абсолютных цифрах) для всех исследованных образцов. Эти пустоты являются результатом межфазных реакций на границе раздела «подложка/припой». Поэтому они были исключены из итоговой оценки и графиков, так как исследование было сосредоточено в основном на пустотах, связанных с технологическим процессом (макропустотах).

Все данные были статистически обработаны с помощью t -критерия Стьюдента со

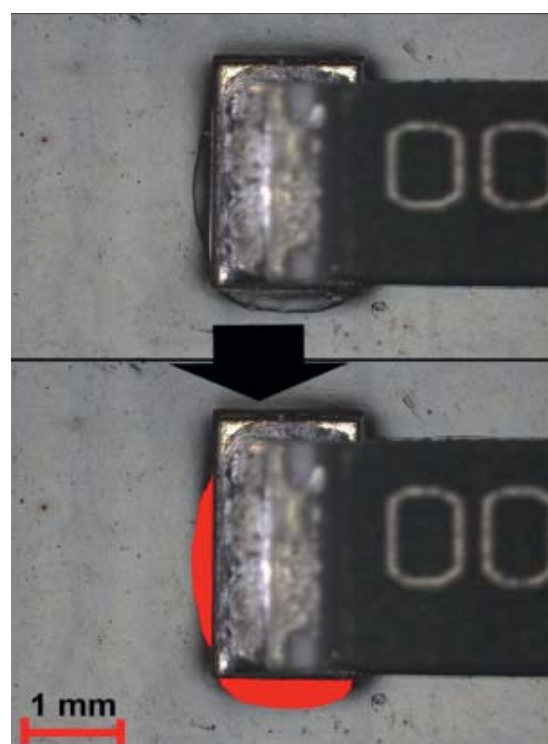


Рис. 5. Изображение с конфокального микроскопа и анализ для определения области растекания припоя

Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

стандартным уровнем значимости (вероятности ошибки) $\alpha = 0,05$. Для выборки использовались результаты оплавления припоя на пяти платах для каждой комбинации типа трафарета, паяльной маски и паяльной пасты.

При рассмотрении влияния типа флюса на образование пустот обнаружено, что образцы, в которых использовалась паяльная паста с ROL1 (паста А), имели меньшую площадь пустот для всех использованных комбинаций

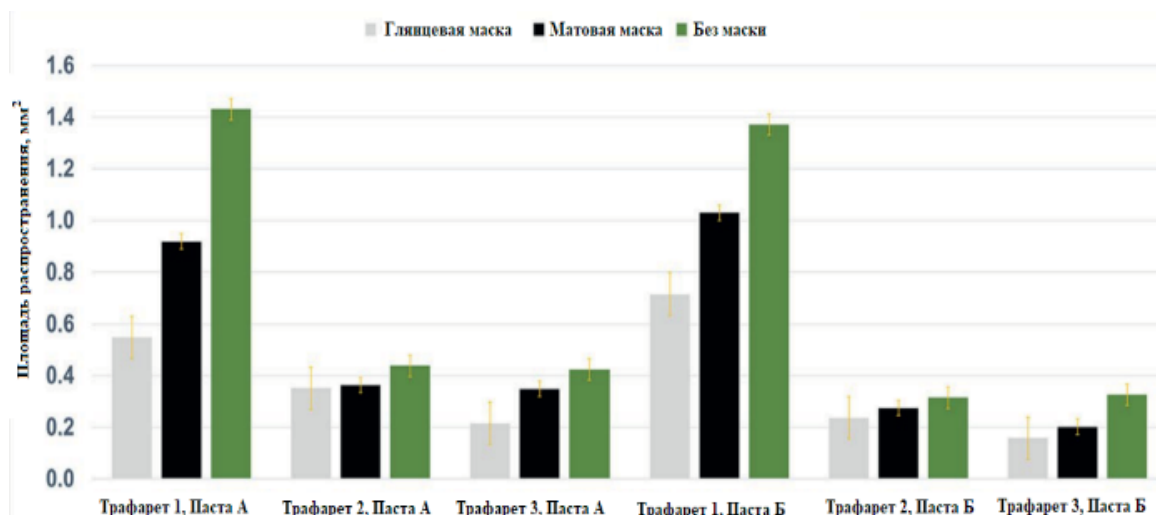


Рис. 6. Область растекания флюса для припоя вокруг контактной площадки
Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

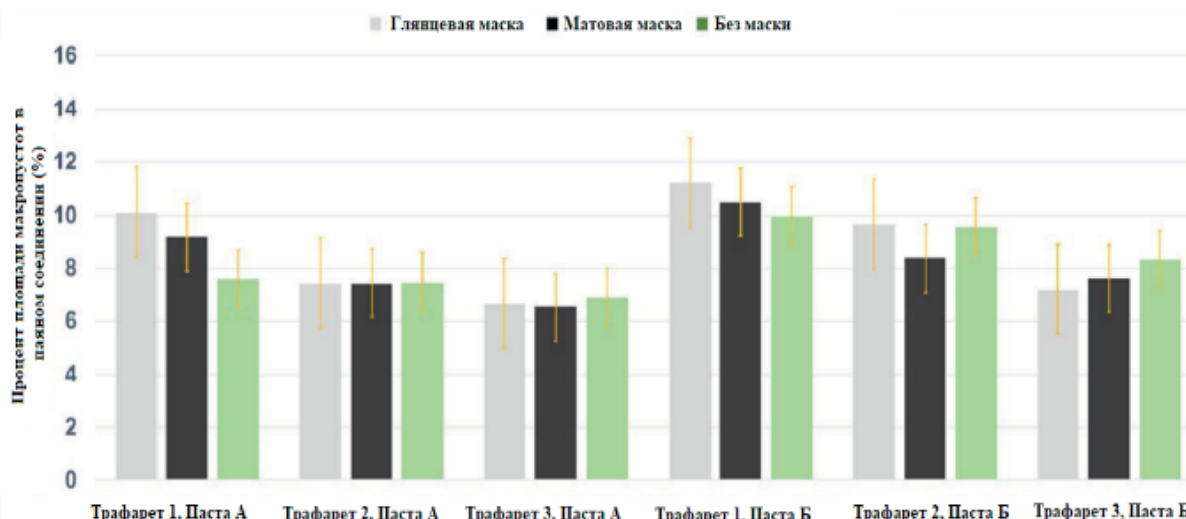


Рис. 7. Общие результаты определения средней площади макропустот в процентах от площади паяного соединения

Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

по сравнению с образцами с паяльной пастой с флюсом ROL0 (паста Б). Содержание пустот в паяных соединениях, изготовленных с использованием пасты А, было на 20 % ниже, чем с пастой Б. Одной из возможных причин меньшей площади пустот в случае ROL1 является его более высокая активность по сравнению с ROL0. Более высокая активность флюса позволяет лучше восстанавливать оксиды с поверхности паяльной площадки. Кроме того, вещества в этом флюсе могут быть более летучими, что может привести к их более быстрому испарению и выходу из объема паяного соединения. Результаты, свидетель-

ствующие о положительном влиянии высокой активности флюса на образование пустот, полностью согласуются с данными, изложенными в источнике [5].

На первый взгляд очевидно, что использование флюса ROL1 (паста А) в целом привело к образованию меньшего количества пустот, но также имело большее растекание вокруг площадки припоя по сравнению с ROL0 (паста Б) (рис. 6, 7). Это означает, что не только активность флюса, но и его способность растекаться на окружающую контактную площадку оказывает влияние на образование пустот.

Согласно t -критерию Стьюдента, разница между пастой А и пастой Б была статистически значимой во всех случаях с вероятностью $p = 0,95$.

Результаты изучения влияния различных конфигураций отверстий трафарета показывают, что образцы, в которых использовались модифицированные конструкции трафаретных отверстий (трафарет 2 и трафарет 3), показывают меньшее образование пустот, чем в случае стандартной конструкции трафаретных отверстий (трафарет 1). В случае трафаретов 2 и 3 паяльная паста (расплавленный сплав, соответственно) имела тенденцию распространяться на первоначально незакрытые участки контактной площадки, что, вероятно, способствовало лучшему газовыделению в процессе пайки. На образцах, подготовленных помощью трафарета 1, растекание расплавленного припоя было практически незначительным, поскольку паяльная паста уже покрыла всю площадь контактной площадки после процесса осаждения паяльной пасты. На рис. 8 представлены различия между образцами, приготовленными с помощью разных трафаретов.

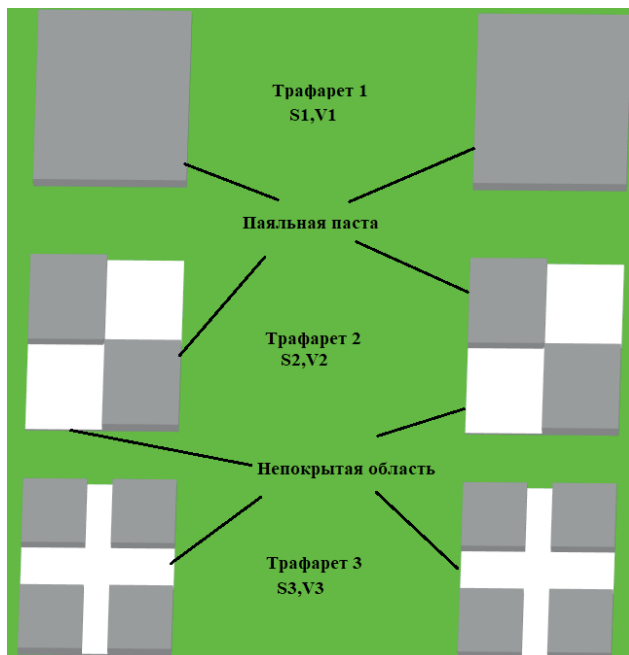


Рис. 8. Одинаковый объем паяльной пасты на контактные площадки с помощью трафарета 1, трафарета 2 и трафарета 3

Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

Очевидно, что объем паяльной пасты сохранился, но площадь покрытия уменьшилась для трафарета 2 и трафарета 3. Влияние использования паяльной пасты Sn96,5Ag3Cu0,5 с различными свойствами от типа точечного флюса и размера порошка на количество и размер пустот внутри паяного соединения исследовали М. Козак и П. Веселый, они подтвердили, что образование несколько более высоких пустот наблюдается в случае паяльной пасты с более мелкими частицами припоя [17]. Однако они не изменяли толщину трафарета, поэтому объем паяльной пасты на площадках уменьшился по сравнению с первоначальной полностью покрытой областью. Это может привести к механическому ослаблению паяного соединения. Кроме того, исследование проводилось только для соединений, паяемых в вакуумной паяльной печи, в то время как представленный эксперимент моделировал более распространенный на практике процесс пайки.

Другой вопрос, который может возникнуть, касается связи между распространением потока флюса в окружающее пространство и изменением размера отверстий трафарета. Очевидно, что распространение флюса в окружающее пространство контактной площадки больше всего для трафарета 1, хотя объем осажденной паяльной пасты и, следовательно, объем флюса на паяльных площадках был одинаковым для всех случаев.

Чтобы лучше понять это явление, проведен анализ нескольких рельефов паяных соединений, с измерением поперечных размеров профилей паяных соединений на контактных площадках. Измерения проводились на конфокальном микроскопе. На рис. 9 показаны различия в размерном профиле между паяными соединениями, подготовленными с помощью трафарета 1 и трафарета 3.

Для трафарета 1 остатки флюса появляются скорее около контактной площадки, в то время как остатки флюса на образцах, приготовленных по трафарету 3, оставались скорее на верхней части паяного соединения. Такое различие в поведении флюса, вероятно, является

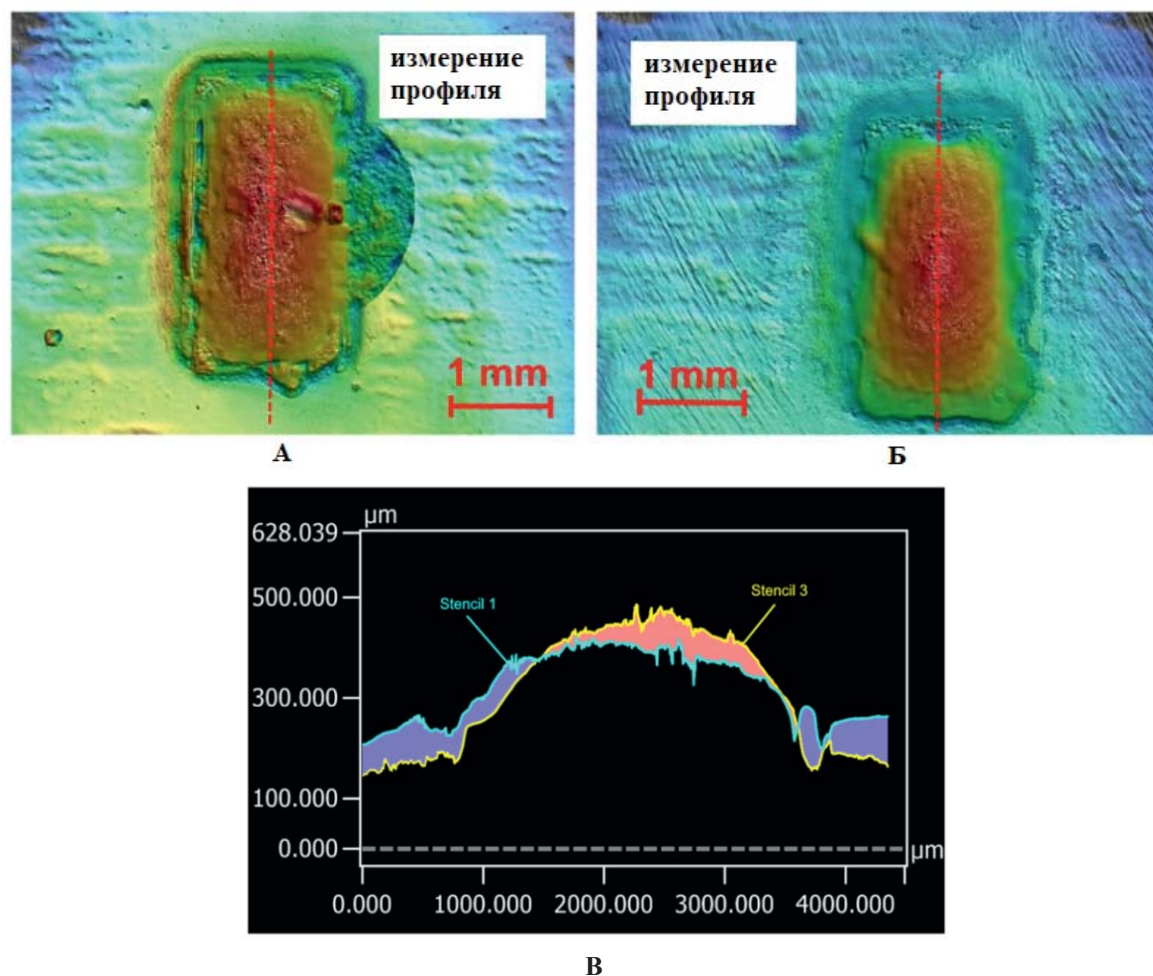


Рис. 9. Рельефы паяного соединения с использованием разных трафаретов:
А – рельеф паяного соединения, подготовленный с использованием трафарета 1 с нанесенной линией измерения профиля размеров; Б – рельеф паяного соединения, подготовленный с использованием трафарета 3 с указанием места измерения профиля размеров; В – полученные размерные профили паяного соединения, подготовленные с помощью трафарета 1 и с помощью трафарета 3

Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

следствием различных процессов смачивания контактных площадок, полностью покрытых паяльной пастой (трафарет 1), и площадок, покрытых лишь частично (трафарет 3). Таким образом, можно утверждать, что основной принцип уменьшения пустот основан в первую очередь на подходе, заключающемся в создании воздушных зазоров и каналов, через которые газовые вещества флюса могут выходить из объема паяного соединения. Кроме того, жидкие вещества вытесняются на верхнюю часть паяного соединения во время процесса пайки.

t -критерий Стьюдента показал, что только разница между трафаретом 1 и трафаретом 2 не была статистически значимой ($p = 0,099$).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе проведенного научного исследования был произведен анализ влияния различных типов паяльной маски на количество пустот внутри паяных соединений. В итоге было отмечено, что в случае осаждения паяльной пасты через немодифицированный трафарет шероховатость поверхности печатной платы существенно влияет на образование пустот в паяном соединении (рис. 7). Наименьшее количество пустот в паяных соединениях наблюдается в тех случаях, когда печатные платы были без паяльной маски. В этом случае отношение пустот к общей площади паяного соединения составило в среднем 10,2 %, что примерно на 20 % меньше по сравнению с пе-

чатной платой с глянцевой паяльной маской. Подложка без паяльной маски продемонстрировала самую высокую шероховатость поверхности из всех рассмотренных вариантов печатных плат. Более высокая шероховатость поверхности обычно увеличивает смачиваемость жидкости [18], таким образом, площадь распространения флюса была больше (рис. 6), и флюс стекал из объема паяного соединения в большей степени. Различия в выделении флюса также можно обнаружить

между матовыми и глянцевыми масками для припоя, хотя влияние на образование пустот не столь существенно – согласно результатам статистического анализа с использованием t -критерия Стьюдента, значение p было равно 0,08.

В случае применения трафарета 2 и трафарета 3 влияние паяльной маски не столь очевидно, как в случае с трафаретом 1. Причина заключается в гораздо меньшем выделении флюса в окрестности паяльной площадки.

Список источников

1. Steiner F., Wirth V., Hirman M. Relationship of soldering profile, voids formation and strength of soldered joints // 42nd International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE), Wroclaw, 2019. P. 1–6. <https://doi.org/10.1109/ISSE.2019.8810303>.
2. Zhu N. Thermal impact of solder voids in the electronic packaging of power devices // Fifteenth Annual IEEE Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium, San Diego, CA, USA, 1999. P. 22–29. <https://doi.org/10.1109/STHERM.1999.762424>.
3. Chen L., Paulasto-Krockel M., Frohler U. et al. Thermal impact of randomly distributed solder voids on Rth-JC of MOSFETs // 2nd Electronics System-Integration Technology Conference, 2008. P. 237–244. <https://doi.org/10.1109/ESTC.2008.4684356>.
4. Zhou Y., Ding D., Han B. et al. Influence of reflow atmosphere on SAC305 solder joints // International Symposium on Advanced Packaging Materials (APM), 2011. P. 122–128.
5. Bušek D., Dušek K., Růžicka D. et al. Flux effect on void quantity and size in soldered joints // Microelectronics Reliability, 2016. Vol. 60. P. 135–140. <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2016.03.009>.
6. Ekere N. N., Lo E. K. New challenges in solder-paste printing // Journal of Electronics Manufacturing, 1991. Vol. 01. P. 29–40. <https://doi.org/10.1142/S0960313191000059>.
7. He D., Ekere N. N., Currie M. A. The behavior of solder pastes in stencil printing with vibrating squeegee // IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology: Part C, 1998. Vol. 21, no. 4. P. 317–324. <https://doi.org/10.1109/TCPMC.1998.7102530>.
8. Hong L.-Y., Li Y.-T., Li H.-F. Minimize Bottom Termination Component Voids by Board Assembly Process & Design Optimization // 17th International Microsystems, Packaging, Assembly and Circuits Technology Conference (IMPACT), Taipei, Taiwan, 2022. P. 1–6. <https://doi.org/10.1109/IMPACT56280.2022.9966717>.
9. Sweatman K., Nishimura T., Sugimoto K. et al. Controlling Voiding Mechanisms in the Reflow Soldering Process // Proceedings IPC APEX Expo, 2016. P. 1–11.

References

1. Steiner F., Wirth V., Hirman M. Relationship of soldering profile, voids formation and strength of soldered joints. In: *42nd International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE)*, Wroclaw. 2019:1–6. <https://doi.org/10.1109/ISSE.2019.8810303>.
2. Zhu N. Thermal impact of solder voids in the electronic packaging of power devices. In: *Fifteenth Annual IEEE Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium*, San Diego, CA, USA. 1999:22–29. <https://doi.org/10.1109/STHERM.1999.762424>.
3. Chen L., Paulasto-Krockel M., Frohler U. et al. Thermal impact of randomly distributed solder voids on Rth-JC of MOSFETs. In: *2nd Electronics System-Integration Technology Conference*. 2008:237–244. <https://doi.org/10.1109/ESTC.2008.4684356>.
4. Zhou Y., Ding D., Han B. et al. Influence of reflow atmosphere on SAC305 solder joints. In: *International Symposium on Advanced Packaging Materials (APM)*. 2011:122–128.
5. Bušek D., Dušek K., Růžicka D. et al. Flux effect on void quantity and size in soldered joints. *Microelectronics Reliability*. 2016;60:135–140. <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2016.03.009>.
6. Ekere N. N., Lo E. K. New challenges in solder-paste printing. *Journal of Electronics Manufacturing*. 1991;01:29–40. <https://doi.org/10.1142/S0960313191000059>.
7. He D., Ekere N. N., Currie M. A. The behavior of solder pastes in stencil printing with vibrating squeegee. *IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology: Part C*. 1998;21(4):317–324. <https://doi.org/10.1109/TCPMC.1998.7102530>.
8. Hong L.-Y., Li Y.-T., Li H.-F. Minimize Bottom Termination Component Voids by Board Assembly Process & Design Optimization. In: *17th International Microsystems, Packaging, Assembly and Circuits Technology Conference (IMPACT)*, Taipei, Taiwan. 2022:1–6. <https://doi.org/10.1109/IMPACT56280.2022.9966717>.
9. Sweatman K., Nishimura T., Sugimoto K. et al. Controlling Voiding Mechanisms in the Reflow Soldering Process. In: *Proceedings IPC APEX Expo*. 2016:1–11.

10. Otáhal A., Somer J., Szendiuch I. Influence of heating direction on BGA solder balls structure // *Microelectronics and Packaging Conference (EMPC) & Exhibition*, Warsaw. 2017. P. 1–4. <https://doi.org/10.23919/EMPC.2017.8346878>.
11. Otáhal A., Somer J., Szendiuch I. Influence of heat flow direction on solder ball interfacial layer // *Journal of Electrical Engineering*. 2018. Vol. 69, no. 4. P. 305–310. <https://doi.org/10.2478/jee-2018-0043>.
12. Wang D., Panton R. L. Effect of Reversing Heat Flux Direction During Reflow on Void Formation in High-Lead Solder Bumps // *Journal of Electronic Packaging*. 2005. Vol. 127, no. 4. P. 440–445. <https://doi.org/10.1115/1.2070047>.
13. Yunus M., Primavera A., Srihari K. et al. Effect of voids on the reliability of BGA/CSP solder joints // *Twenty Sixth IEEE/CPMT International Electronics Manufacturing Technology Symposium*, Santa Clara, CA, USA, 2000. P. 207–213. <https://doi.org/10.1109/IEMT.2000.910730>.
14. Nurmi S. T., Sundelin J. J., Ristolainen E. O. et al. The effect of PCB surface finish on lead-free solder joints // *Soldering & Surface Mount Technology*. 2005. Vol. 17, no. 1. P. 13–23. <https://doi.org/10.1108/09540910510579203>.
15. ГОСТ Р МЭК 61190-1-1-2020. Материалы для электронных модулей. Требования к паяльным флюсам для высококачественных межсоединений в электронных сборках. Ч. 1–1. М., 2020. 16 с. URL: <https://www.elec.ru/viewer?url=/files/2021/08/09/GOST-R-MEK-61190-1-1-2020.pdf> (дата обращения: 18.09.2024).
16. Veselý P., Bušek D., Krammer O. et al. Analysis of noclean flux spatter during the soldering process // *Journal of Materials Processing Technology*, 2020. Vol. 275. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.116289>.
17. Kozák M., Veselý P. Study of voids inside solder joints based on SAC305 solder paste with different properties // *43rd International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE)*, 2020. P. 1–5. <https://doi.org/10.1109/ISSE49702.2020.9120951>.
18. Hirman M., Steiner F. Optimization of solder paste quantity considering the properties of solder joints // *Soldering & Surface Mount Technology*. 2017. Vol. 29, no. 1. P. 15–22. <https://doi.org/10.1108/SSMT-10-2016-0025>.
10. Otáhal A., Somer J., Szendiuch I. Influence of heating direction on BGA solder balls structure. In: *Microelectronics and Packaging Conference (EMPC) & Exhibition*, Warsaw. 2017:1–4. <https://doi.org/10.23919/EMPC.2017.8346878>.
11. Otáhal A., Somer J., Szendiuch I. Influence of heat flow direction on solder ball interfacial layer. *Journal of Electrical Engineering*. 2018;69(4):305–310. <https://doi.org/10.2478/jee-2018-0043>.
12. Wang D., Panton R. L. Effect of Reversing Heat Flux Direction During Reflow on Void Formation in High-Lead Solder Bumps. *Journal of Electronic Packaging*. 2005;127(4):440–445. <https://doi.org/10.1115/1.2070047>.
13. Yunus M., Primavera A., Srihari K. et al. Effect of voids on the reliability of BGA/CSP solder joints. In: *Twenty Sixth IEEE/CPMT International Electronics Manufacturing Technology Symposium*, Santa Clara, CA, USA. 2000:207–213. <https://doi.org/10.1109/IEMT.2000.910730>.
14. Nurmi S. T., Sundelin J. J., Ristolainen E. O. et al. The effect of PCB surface finish on lead-free solder joints. *Soldering & Surface Mount Technology*. 2005;17(1):13–23. <https://doi.org/10.1108/09540910510579203>.
15. GOST R MEK 61190-1-1-2020. Materialy dlya elektronnykh moduley. Trebovaniya k payalnym flyusam dlya vysokokachestvennykh mezhsoedineniy v elektronnykh sborkakh. Pt. 1–1. Moscow. 2020. 16 p. URL: <https://www.elec.ru/viewer?url=/files/2021/08/09/GOST-R-MEK-61190-1-1-2020.pdf> (accessed: 18.09.2024). (In Russ.).
16. Veselý P., Bušek D., Krammer O. et al. Analysis of noclean flux spatter during the soldering process. *Journal of Materials Processing Technology*. 2020;275. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.116289>.
17. Kozák M., Veselý P. Study of voids inside solder joints based on SAC305 solder paste with different properties. In: *43rd International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE)*. 2020:1–5. <https://doi.org/10.1109/ISSE49702.2020.9120951>.
18. Hirman M., Steiner F. Optimization of solder paste quantity considering the properties of solder joints. *Soldering & Surface Mount Technology*. 2017;29(1):15–22. <https://doi.org/10.1108/SSMT-10-2016-0025>.

Информация об авторах

А. В. Турецкий – кандидат технических наук, доцент.

А. А. Пирогов – кандидат технических наук, доцент.

И. В. Свиридова – старший преподаватель.

М. В. Хорошайлова – кандидат технических наук, доцент.

Э. В. Сёмка – кандидат физико-математических наук, доцент.

About the authors

A. V. Turetsky – Candidate of Sciences (Engineering), Docent.

A. A. Pirogov – Candidate of Sciences (Engineering), Docent.

I. V. Sviridova – Senior Lecturer.

M. V. Khoroshailova – Candidate of Sciences (Engineering), Docent.

E. V. Syomka – Candidate of Sciences (Physics and Mathematics), Docent.