

Оценка погрешности совмещения элементов проводящего рисунка печатных плат, полученных с помощью 3D-печати

О. Н. Смирнова[✉], А. А. Александров, Ю. С. Боброва, К. М. Моисеев

Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, Москва, Россия

[✉] olga.smirnova.nik@gmail.com

Аннотация

Введение. При изготовлении печатных плат (ПП), в том числе их макетов, одной из важных задач является обеспечение совмещения одних слоев проводящего рисунка с другими. Если для применяемых на сегодняшний день (стандартных) технологий изготовления величины рассовмещений, причины их возникновения и меры предотвращения их возникновения известны, то для ПП, изготовленных методами 3D-печати, подобные исследования прежде не проводились. В дополнение к этому актуальной темой для 3D-печати, непосредственно связанной с топологической точностью, а именно одной из ее составляющих – погрешностью совмещения, является обеспечение возможности извлечения напечатанной части изделия во время печати для проведения определенных операций, например внутреннего монтажа компонентов, и ее последующий возврат для продолжения печати.

Цель работы. Количественная оценка и анализ причин возникновения погрешности межслойного совмещения ПП, изготовленных с помощью 3D-печати.

Материалы и методы. Для исследования используются: материал – полиэтилентерефталат-гликоль (PETg); слайсер – Ultimaker Cura; 3D-принтер – Ender 3 S1; латунное экструзионное сопло диаметром 0.3 мм. Исследование проводится на производственной базе Научно-образовательного центра "Центр аддитивных технологий" при МГТУ им. Н. Э. Баумана. Оценка погрешности совмещения выполняется по микрошлифам, результатам рентгеновского контроля и использования подхода к декомпозиции погрешностей, описанного Ю. Б. Цветковым для изделий электроники.

Результаты. Показана возможность изготовления макетов ПП с тремя проводящими слоями, в том числе с возможностью извлечения напечатанной части изделия с последующим возвратом за счет ее совмещения по напечатанным штифтам. Выявлено, что наибольший вклад в погрешность совмещения вносят масштабные искажения: в среднем около 150 мкм для каждого слоя в сравнении с его 3D-моделью и около 60 мкм при сравнении топологий слоев Top с Bottom, что превышает общее значение рассовмещения между двумя слоями в ± 50 мкм, характерное для штифтовой технологии совмещения, и говорит о необходимости контроля и минимизации возникающих температурных воздействий, например, с использованием термостатируемой рабочей камеры 3D-принтера.

Заключение. Анализ возможных причин возникновения рассовмещений показывает значимость влияния температурных градиентов, возникающих во время 3D-печати. Предложенный способ изготовления позволяет извлечь изделие во время печати с последующим возвратом и может быть использован для создания макетов ПП с двумя и более проводящими слоями независимо от применяемого метода 3D-печати.

Ключевые слова: печатные платы, погрешность совмещения, топологическая точность, послойное наложение филамента, FDM-технология, 3D-печать

Для цитирования: Оценка погрешности совмещения элементов проводящего рисунка печатных плат, полученных с помощью 3D-печати / О. Н. Смирнова, А. А. Александров, Ю. С. Боброва, К. М. Моисеев // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2024. Т. 27, № 3. С. 6–19. doi: 10.32603/1993-8985-2024-27-3-6-19

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 15.02.2024; принята к публикации после рецензирования 25.04.2024; опубликована онлайн 28.06.2024

Alignment Error Estimation of the Conductive Pattern of 3D-Printed Circuit Boards

Olga N. Smirnova , Alexander A. Aleksandrov, Yulia S. Bobrova, Konstantin M. Moiseev

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

 olga.smirnova.nik@gmail.com

Abstract

Introduction. When manufacturing printed circuit boards (PCBs), including their prototypes, the proper alignment of PCB layers is mandatory. While the causes and preventive measures against misalignment in PCBs manufactured using conventional technologies are known, research into alignment errors in 3D-printed PCBs is still ongoing. Another task regarding 3D printing, which is related to topological accuracy (alignment errors in particular), consists in ensuring the opportunity to remove the printed part of the product in order to perform operations thereon, such as embedding components, followed by its return and continuation of the printing process.

Aim. Numerical estimation and analysis of the causes of layer-to-layer alignment errors in PCBs manufactured using 3D printing.

Materials and methods. The research was conducted using the following materials and equipment: Polyethylene terephthalate glycol (PETG); an Ultimaker Cura slicer; an Ender 3 S13D printer; a brass nozzle with a diameter of 0.3 mm. The study was conducted using the facilities of the Additive Technologies Center, Bauman Moscow State Technical University. Interlayer alignment errors are estimated by microsection analysis and X-ray inspection, as well as using the misalignment decomposition method described by Yu. B. Tsvetkov for electronics.

Results. The possibility of manufacturing PCB prototypes with three conductive layers is demonstrated, including a method for removing the printed part of the product and its further return in the printing process using printed pins. Large-scale distortions were found to make the largest contribution to the alignment error: on average, approximately 150 μm for each layer when compared to its 3D model and approximately 60 μm when comparing the topology of the top layer with the bottom layer. These values exceed the common misalignment value of 50 μm for the pin lamination process. This substantiates the need to control and minimize temperature effects, e.g., using 3D printers with a thermostatically-controlled chamber.

Conclusion. The conducted analysis of possible causes of misalignment emergence determines the significance of temperature gradients that occur during 3D printing. The proposed manufacturing method allows the printed part of the product to be removed and further returned into the printing process, which can be used to produce PCB prototypes with three conductive layers.

Keywords: printed circuit boards, alignment errors, topological accuracy, Fused Filament Fabrication, Fused Deposition Modeling, FDM, 3D printing

For citation: Smirnova O. N., Aleksandrov A. A., Bobrova Yu. S., Moiseev K. M. Alignment Error Estimation of the Conductive Pattern of 3D-Printed Circuit Boards. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2024, vol. 27, no. 3, pp. 6–19. doi: 10.32603/1993-8985-2024-27-3-6-19

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Submitted 15.02.2024; accepted 25.04.2024; published online 28.06.2024

Введение. Стремление к миниатюризации печатных плат (ПП), т. е. уменьшению их размера и ширины печатных проводников и совершенствованию процессов их изготовления, т. е. сокращению времени, денежных средств и отходов, способствует активному освоению и внедрению прогрессивных производственных процессов, обеспечивающих использование всех преимуществ современных цифровых техноло-

гий, к которым относится 3D-печать, обладающая следующими основными преимуществами:

– уменьшение себестоимости изделий по причине сокращения производственного цикла и низкого расхода материалов;

– повышение эффективности производства в результате снижения затрат на сборочно-монтажные операции и упрощения внутрицеховой логистики;

Табл. 1. Параметры печати

Tab.1. Printing parameters

Параметр	Значение	Ед. изм.
Шаблон заполнения (в том числе для верхней и нижней поверхностей)	Прямолинейный	–
Плотность заполнения	100	%
Скорость перемещения при печати:		
– заполнение, периметры (в том числе внешние), мосты	30	мм/с
– маленькие периметры	15	мм/с
– заполнение пробелов	10	мм/с
Скорость печати первого слоя	20	мм/с
Радиус закрытия пробелов при нарезке	0.049	мм
Режим нарезки	Обычный	–
Разрешение нарезки	0	мм
Разрешение G-кода	0.0125	мм
Тип каймы	Кайма только снаружи	–
Ширина каймы	4	мм
Диаметр экструзионного сопла	0.30	мм
Высота слоя (в том числе первого)	0.15	мм
Количество контуров/периметров	1	шт
Ширина экструзии (в том числе первый слой, периметры, заполнение)	0.28	мм
Температура разжижителя	235	°C
Температура рабочей платформы	90	°C

– уменьшение требований к обеспечению условий производства (величины показателей микроклимата, классы чистоты производственных помещений и т. п.).

Литературный обзор исследований в данной области показывает возможность применения шести методов 3D-печати для изготовления ПП: аэрозольное нанесение материала (Aerosol Jet Printing – AJP), капельное нанесение материала (Drop on Demand – DOD), прямое нанесение материала (Direct Ink Writing – DIW), цифровое осаждение материала (Digital Material Deposition – DMD), многофункциональное нанесение (Multi-Functional Additive Manufacturing – MFAM) и послойное наложение филамента (Fused Deposition Modeling – FDM) [1]. Причем первые четыре метода уже имеют специализированное коммерческое оборудование для изготовления ПП. Однако оно, как и расходные материалы для него, довольно дорогостоящее и в настоящее время недоступно в России, поскольку производится только зарубежными компаниями. Тем не менее среди данных методов практически полностью импортозамещенным с доступными расходными материалами является метод послойного наложения филамента (ПНФ). Известны попытки использования этого метода для изготовления ряда изделий электронной техники, в частности имитатора ПП со встроенными компонентами

[2], носимой электроники [3], тензометрического датчика [4] и др. По совокупности своих возможностей и преимуществ метод ПНФ был выбран для проведения исследований.

Вместе с тем для данного метода 3D-печати отсутствуют какие-либо сведения об обеспечиваемой им точности совмещения слоев, от которой зависит наличие контакта между слоями и возможность монтажа компонентов.

Таким образом, целью исследования являлась количественная оценка погрешности межслойного совмещения ПП, изготовленных с помощью 3D-печати.

Методика проведения эксперимента и материалы. Оборудование и расходные материалы. Исследование проводилось в Научно-образовательном центре "Центр аддитивных технологий" (НОЦ "ЦАТ") МГТУ им. Н. Э. Баумана на 3D-принтере Ender 3 S1 (Creality, Китай) [5]. G-код¹ формируется с помощью слайсера² Ultimaker Cura (версия 5.2.1), а в качестве расходного материала применяется полиэтилентерефталат-гликоль (PETg) фирмы Filamentaro (Россия). Параметры печати приведены в табл. 1.

¹ Условное наименование языка программирования устройств с числовым программным управлением.

² Программа, создающая G-код на основе виртуального "расслаивания 3D-модели" по оси Z, соответствующей толщине платы, на слои заданной толщины.

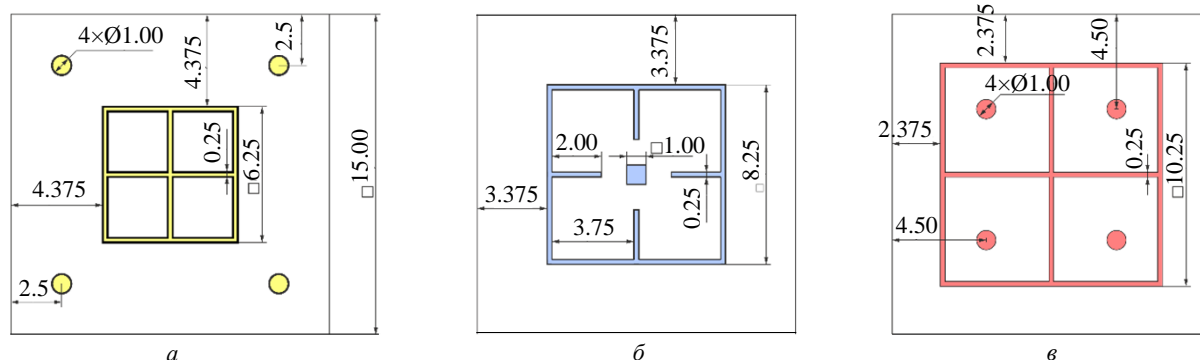


Рис. 1. Топология экспериментального образца: а – слой Top; б – слой Middle; в – слой Bottom

Fig. 1. Layout of the experimental sample: а – Top layer; б – Middle layer; в – Bottom layer

Экспериментальный образец. В качестве экспериментального образца выступает макет трехслойной ПП. Выбор нечетного количества проводящих слоев обусловлен демонстрацией открывающихся конструктивных возможностей за счет снятия ограничения для стандартных технологических процессов, а именно необходимости соблюдения баланса меди для предотвращения коробления при прессовании. Топология образца состоит из каналов проводников квадратного сечения, образующих квадраты разных размеров на каждом слое (рис. 1). Элементы проводящего рисунка (ЭПР) данного образца соответствуют 3-му классу точности по ГОСТ Р 53429 [6], которого удалось достигнуть для метода ПНФ в [7].

Технологический процесс и методика проведения эксперимента. Как правило, изготовление изделий методом 3D-печати, в том числе и методом ПНФ, не требует проведения дополнительных операций и вмешательства со стороны человека за исключением следующих случаев:

- 1) изготовление многослойных ПП при использовании 3D-принтеров с одной экструзионной головкой (ЭГ), т. е. возможна печать лишь одним материалом;
- 2) изготовление печатных узлов с интегрированными компонентами.

В этих случаях точность совмещения будет обеспечиваться не только точностью позиционирования ЭГ, но и технологическим решением для обеспечения межслойного совмещения.

В первом случае процесс изготовления может быть реализован без извлечения изделия путем заполнения каналов проводников проводящим материалом, в качестве которого в работе используется паяльная паста. Заполнение осуществляет-

ся вручную с помощью шприца с иглой, диаметр которой меньше или равен величине заполняемого канала, во время паузы печати с последующим возобновлением печати (рис. 2, а). Выбор паяльной пасты обусловлен ее рентгеноконтрастностью, однако в качестве проводящих материалов целесообразнее использовать уже отработанные материалы или подходящие для технологического процесса по вязкости, удельному сопротивлению и температуре отверждения: серебряные наночернила [8], медную проволоку [9], галлестан [3], токопроводящий клей марки ТПК-1С ТУ 6365-007-07615973-08 и др.

Во втором случае отсутствие какой-либо системы определения местоположения части напечатанного изделия или подложки значительно усложняет изготовление, так как проведение манипуляций без извлечения напечатанной части изделия не представляется возможным. Для решения этой проблемы, без изменения конструкции оборудования, предлагается подход, аналогичный применяемой штифтовой технологии для совмещения элементов смежных слоев ПП [1], точность которой напрямую зависит от зазора между диаметрами базового отверстия и штифта и составляет более ± 50 мкм [10]. Таким образом, в процесс изготовления добавляется операция межслойного совмещения (рис. 2, б).

Для проведения операции межслойного совмещения напечатаны конические штифты (угол наклона 2°) круглого сечения $\varnothing 3$ мм. С целью предотвращения искажений формы штифтов и расплавления их напечатанных слоев из-за избыточной тепловой энергии экструдированного материала (ЭМ) одновременно со штиф-

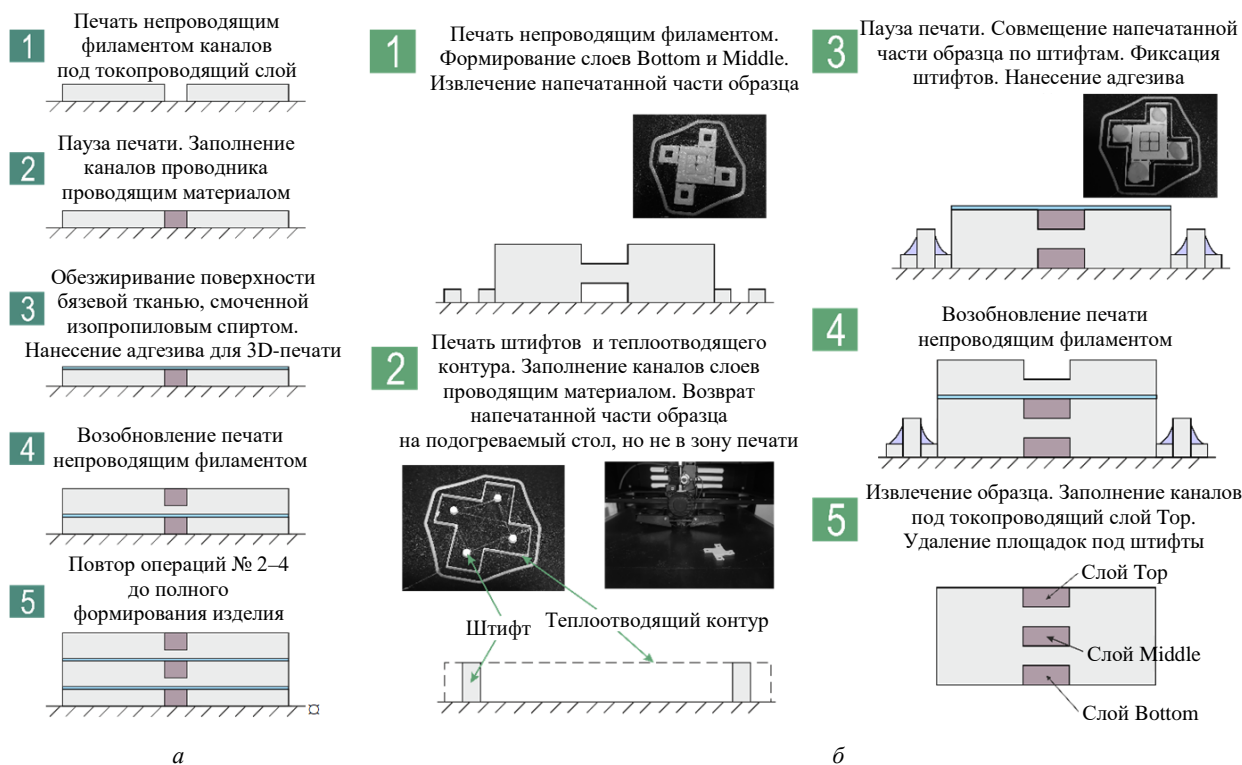


Рис. 2. Способы изготовления экспериментального образца: а – без применения операций межслойного совмещения; б – с использованием минимального количества операций межслойного совмещения

Fig. 2. Methods for manufacturing multilayer PCBs:
а – without alignment operations; б – with minimum alignment operations

тами напечатан "теплоотводящий контур", за время послойного формирования которого напечатанные слои штифтов остывают и отверждаются. В качестве системы базирования выбрана четырехслотовая система, отличительной характеристикой которой является усреднение отклонений по двум координатным осям [11].

Линейные размеры образцов измерены с помощью штангенциркуля ШЦЦ-I-150-0.01 ГОСТ 166–89, погрешность измерений которого составляет ± 0.03 мм, а ЭПР и их расположения – с помощью цифрового USB-микроскопа Weller T0051383599N, погрешность измерений которого составляет ± 0.025 мм. Для проведения рентгеновского контроля используется рентгеновская установка Phoenix nanome|x (General Electric Company, Германия). Микрошлифы изготовлены в соответствии с ГОСТ IEC 61189-3–2013 (испытание 3X09) [12] с отверждением образцов на воздухе из-за значительного газовыделения филамента.

Технологические особенности процесса 3D-печати методом ПНФ. При изготовлении образцов без применения операций межслойного совмещения установлено следующее:

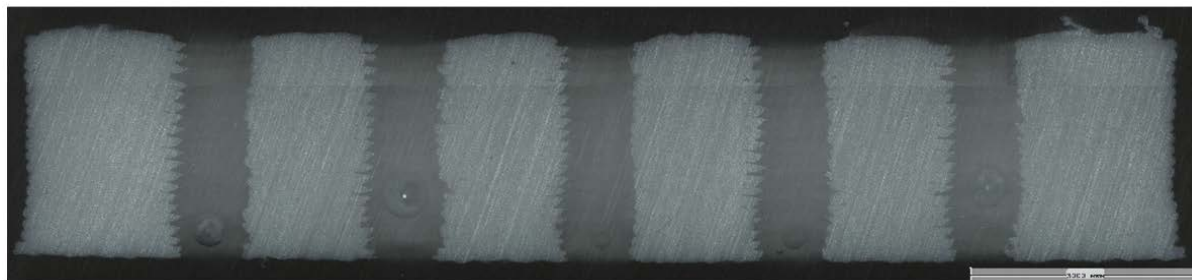
– для предотвращения потери адгезии к напечатанным слоям после заполнения каналов проводящим материалом необходима операция обезжиривания;

– для увеличения адгезии печатаемых слоев к слою, на котором останавливается печать, после операции обезжиривания на напечатанную часть образца следует дополнительно наносить адгезив;

– для предотвращения появления границы раздела между слоем, на котором остановлена печать, и последующими слоями на 3D-принтере без подогреваемой рабочей камеры следует увеличивать временной интервал от завершения операций обезжиривания и обезпечения дополнительной адгезии до возобновления печати (рис. 3). Предполагается, что это приводит к испарению остатков обезжиривателя на поверхности слоя, на котором печать остановлена, под влиянием тепла, исходящего от подогреваемой рабочей платформы (РП).

Кроме того, при возобновлении процесса печати наблюдается частичное отсутствие соединения между уже напечатанными слоями и печатаемым слоем, что, вероятно, обусловлено

Без пауз во время печати



Паузы с разным временным интервалом с обезжириванием
и нанесением адгезива на напечатанную часть и возобновление печати

~ 130 °C (пауза ~ 60 с;
нагрев экструзионного сопла ~ 70 с)

~ 265 °C (пауза ~ 180 с;
нагрев экструзионного сопла ~ 85 с)

~ 390 °C (пауза ~ 300 с;
нагрев экструзионного сопла ~ 90 с)

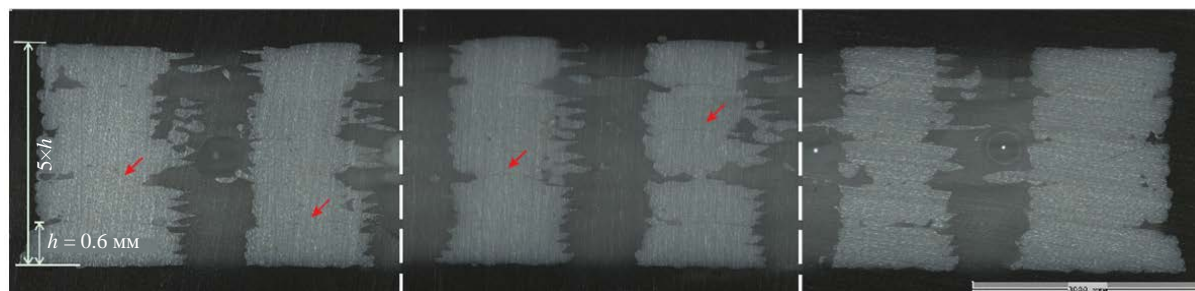


Рис. 3. Влияние временного интервала от завершения операции обезжиривания и нанесения адгезива до возобновления печати на адгезию между напечатанными и печатаемыми слоями

Fig. 3. Influence of various time intervals between the stage of degreasing and applying adhesive to resuming printing on the adhesion between the printed and printing layers

недостатком тепловой энергии частично расплавленного ЭМ для диффузного соединения слоев [13], вызванным дополнительными затратами энергии на нагрев охлажденных во время остановки напечатанных слоев. Решением этой проблемы является применение 3D-принтеров с термостатируемой камерой для предварительного нагрева напечатанной части образца перед возобновлением печати.

При изготовлении ПП с применением операции межслойного совмещения установлено следующее:

- для уменьшения смещения образца при 3D-печати следует минимизировать зазор между соприкасающимися поверхностями напечатанных штифтов и базовых отверстий;
- для снижения масштабных и геометрических искажений слоев ПП, а также обеспечения необходимой адгезии между ними необходимо поддерживать температуру на поверхности образца не ниже температуры РП при осаждении частично расплавленного ЭМ;
- для предотвращения искажения формы изделий из-за температурных деформаций рекомендуется использовать минимально возможное

количество операций совмещения слоев ПП;

– для улучшения совмещения и снижения искажений формы следует выбрать систему базирования по четырем сторонам (рис. 4), причем базирующие отверстия под штифты должны быть расположены несимметрично друг относительно друга для уменьшения смещения образца;

– для предотвращения возврата образца в область печати в неправильном положении рекомендуется в 3D-модели образца разместить специальную отметку-ключ на системе базирования, позволяющую однозначно идентифицировать правильное положение образца.

Качественная оценка погрешностей совмещения. Для оценки полученной погрешности совмещения проведен рентгеновский контроль (рис. 5). Точками обозначены центры ЭПР: голубой – слой Top, розовый – слой Bottom.

Рентгеновские снимки образцов показывают наличие погрешности совмещения, что также подтверждается изображениями микрошлифов. Причем визуально направление смещений одних ЭПР относительно других напоминает вид масштабных искажений (растяже-

Оценка погрешности совмещения элементов

проводящего рисунка печатных плат, полученных с помощью 3D-печати

Alignment Error Estimation of the Conductive Pattern of 3D-Printed Circuit Boards

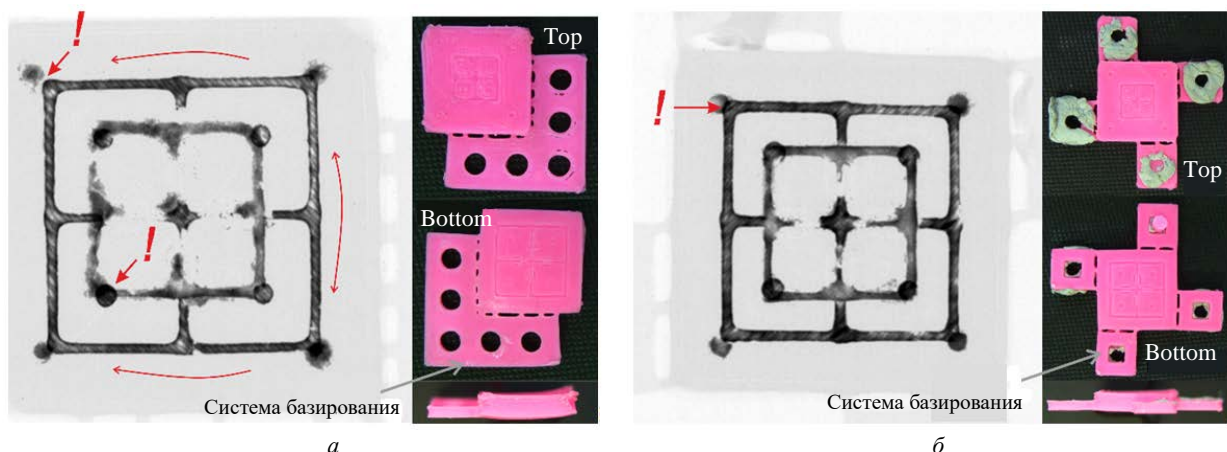


Рис. 4. Экспериментальные образцы, изготовленные с применением операции межслойного совмещения с использованием разных систем базирования: а – L-конфигурация (по двум сторонам); б – 4-слотовая (по четырем сторонам)

Fig. 4. Experimental samples produced with alignment operations using different basing systems: а – L-configuration (on two sides); б – 4-slot (on four sides)

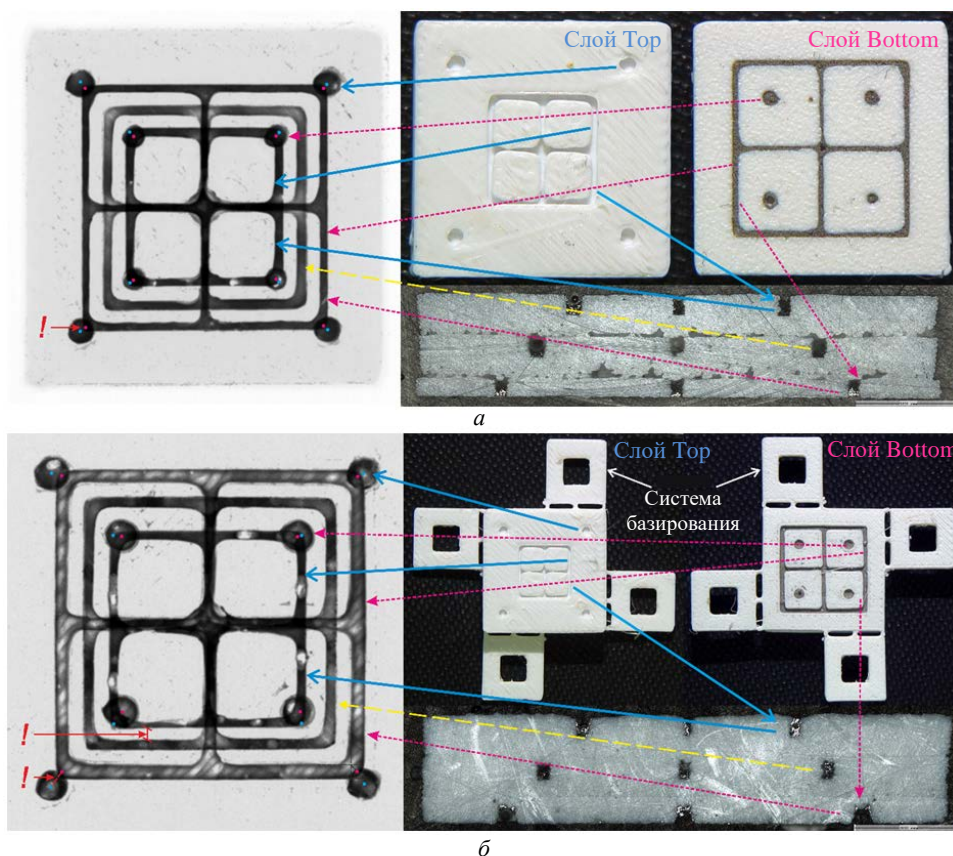


Рис. 5. Экспериментальные образцы, изготовленные разными способами: а – без операции межслойного совмещения; б – с операцией межслойного совмещения

Fig. 5. Experimental samples produced by different methods: а – without alignment operations; б – with alignment operations

ние/сжатие) для образца, изготовленного без применения операции межслойного совмещения. Для образца, изготовленного с применением операции межслойного совмещения, картина распределения погрешности неясна, единственное, можно отметить смещение слоя Top относительно других слоев.

С целью проверки предположения о влиянии топологии образцов на погрешность совмещения изготовлены без использования операций межслойного совмещения образцы с другим проводящим рисунком, состоящим только из отверстий, одинаково или нет расположенных в объеме образца (рис. 6). На рисунке слева

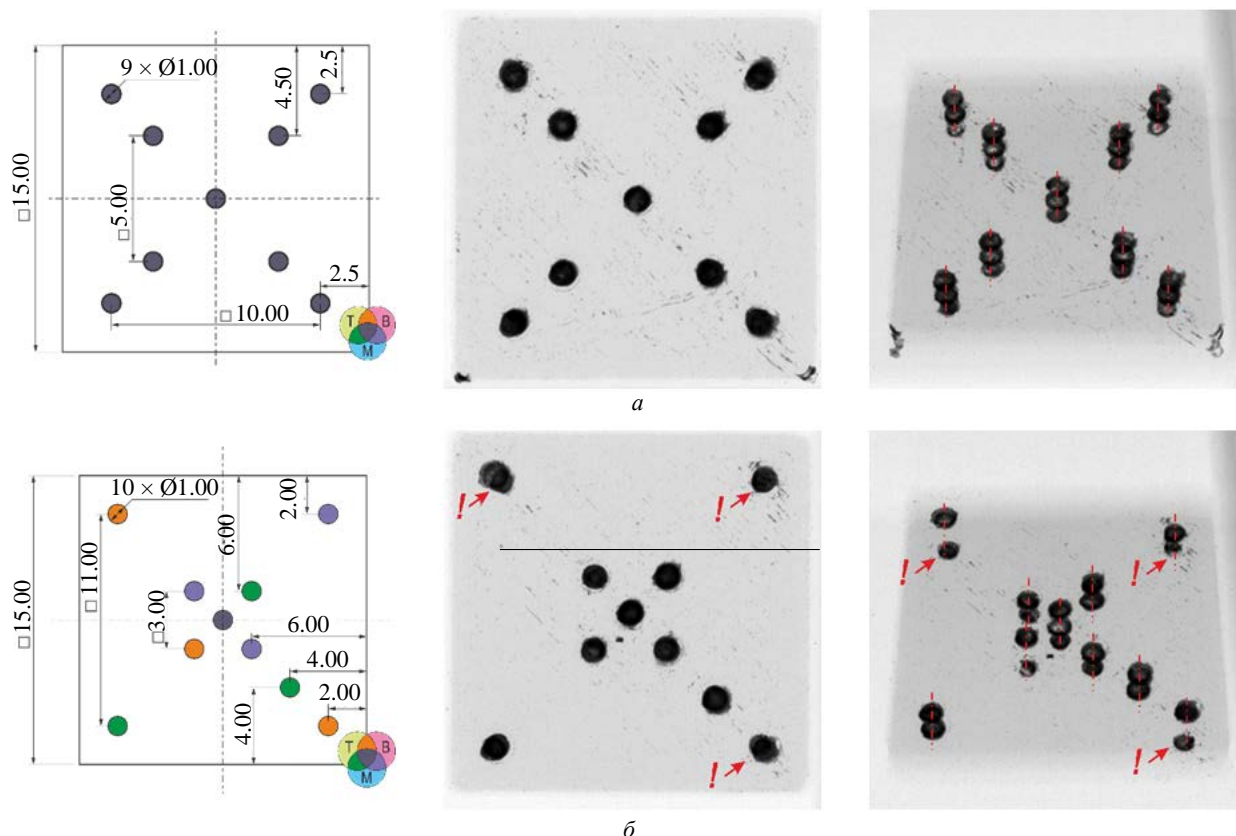


Рис. 6. Образцы с топологией, состоящей только из отверстий: а – одинаковая топология всех слоев; б – разная топология всех слоев

Fig. 6. Samples with vias as the only topology feature: а – same topology of each layer; б – different topology of each layer

направо показаны: схема, информационная проекция сверху, информационная проекция под углом. Также с помощью диаграммы Эйлера графически обозначена цветовая легенда, где Т – слой Top, М – слой Middle, В – слой Bottom. Проведенный рентгеновский контроль показывает, что визуальное рассовмещение для образца с одинаковой топологией всех слоев ниже, чем у образца с различным проводящим рисунком в объеме, причем погрешность совмещения между слоями Top и Bottom кажется больше, чем между соседними слоями. Таким образом, на качественном уровне подтверждается влияние топологии на погрешность совмещения.

Количественная оценка погрешности совмещения. В связи с тем, что установки рентгеновского контроля не являются средствами измерений, а по микрошлифам возможна оценка погрешности совмещения только по одной из осей, расположенной вдоль плоскости шлифа, данные методы не могут дать полное представление об имеющихся погрешностях.

Однако количественная оценка погрешности совмещения по двум осям координат возможна путем ее декомпозиции³, подход к проведению которой описан Ю. Б. Цветковым для изделий электроники [14].

Данный подход позволяет выявить три однотипные составляющие погрешности совмещения (сдвиг, угловой разворот, масштабные искажения) и оценить величину случайных погрешностей по четырем парам ЭПР. Основой для дифференцированной оценки отдельных составляющих являются регрессионные модели погрешностей совмещения, описывающие их распределение по полю топологического слоя. В данном подходе рассовмещение $(\Delta x_i, \Delta y_i)$ в конкретной точке с координатами $X_i Y_i$ представляется в виде

³ Разложение погрешностей на составляющие, каждая из которых характеризует влияние того или иного фактора или их совокупностей.

$$\Delta x_i = \Delta x_0 + \alpha_x Y_i + \mu_x X_i + \delta x_i;$$

$$\Delta y_i = \Delta y_0 - \alpha_y X_i + \mu_y Y_i + \delta y_i;$$

где Δx_0 , Δy_0 – сдвиг одной системы координат относительно другой; α_x , α_y – угловой разворот; μ_x , μ_y – масштабные искажения (растяжение-сжатие); δx_i , δy_i – случайные погрешности, возникающие в результате совместного воздействия незначительных по величине, часто разнонаправленных факторов. Предполагается, что их распределение носит вероятностный характер и может быть оценено с помощью метода наименьших квадратов.

Особенностью применения данного подхода для 3D-печати, в том числе для метода ПНФ, является использование в качестве исходных данных, вычисленных на основе произведенных измерений координат центров ЭПР, выбранных в качестве оцениваемой пары (рис. 7), вместо расстояний от края отверстия до соответствующего края контактной площадки, являющихся "классической" оцениваемой парой.

Полученные результаты (табл. 2) показывают, что наибольший вклад в погрешность совмещения вносят масштабные искажения, а также наблюдается увеличение сдвига слоев друг относительно друга при применении операций межслойного совмещения (наибольшее

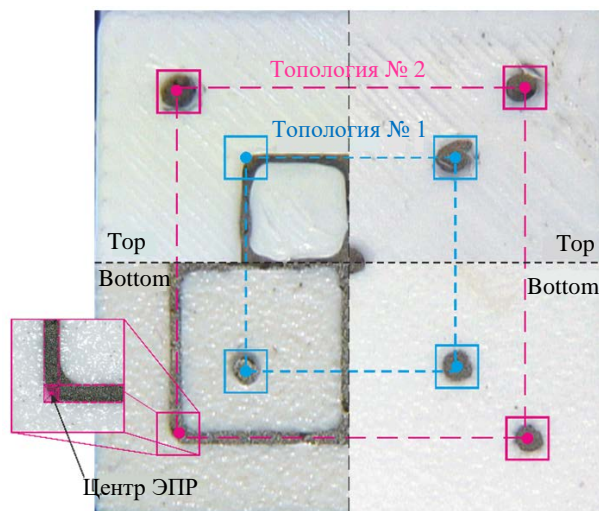


Рис. 7. Выбранные пары ЭПР и обозначение топологий, совмещение которых подлежит оценке: слева – образец с топологией, состоящей из каналов под проводники и отверстий; справа – образцы с топологией, состоящей только из отверстий

Fig. 7. Selected pairs of elements of conductive patterns and designation of topologies, which are subjected to alignment estimation: on the left – a sample with vias and channels for traces as topology features; on the right – a sample with vias as the only topology feature

по модулю значение выделено красным, наименьшее – зеленым). Кроме того, полученные средние значения отклонения центров ЭПР превышают значения ± 50 и ± 17 мкм, характерные для штифтовой и бесштифтовой технологий совмещения, применяемых в стандартных технологических процессах [10].

Табл. 2. Результат декомпозиции смещения слоя Top относительно слоя Bottom

Tab. 2. Decomposition of the Top layer displacement relative to the Bottom layer

Схема		Рис. 1		Рис. 1		Рис. 5, <i>a</i>		
Наличие операции межслойного совмещения		Да		Нет		Нет		
Общий вид		Рис. 4, <i>б</i>		Рис. 4, <i>a</i>		Рис. 5, <i>a</i>		
№ топологии		1	2	1	2	1	2	
Среднее значение отклонения центров ЭПР по модулю, мм		X	0.073	0.088	0.133	0.058	0.185	0.171
		Y	0.041	0.046	0.111	0.031	0.176	0.159
Составляющая погрешности совмещения, мм	Сдвиг	X	-0.073	-0.088	-0.072	-0.039	-0.052	-0.074
		Y	-0.028	-0.011	0.01	-0.031	-0.005	-0.005
	Угловой разворот	X	-0.008	0.013	-0.007	0.024	-0.019	0.012
		Y	0.034	0.042	0.033	-0.017	-0.028	0
	Масштабные искажения	X	0.025	-0.029	0.133	0.036	0.185	0.171
		Y	0.014	-0.022	0.111	-0.024	0.176	0.159
	Случайные погрешности	X	0.05	0.07	0.001	0.031	0.052	0.069
		Y	0.07	0.035	0.114	0.047	0.006	0.003

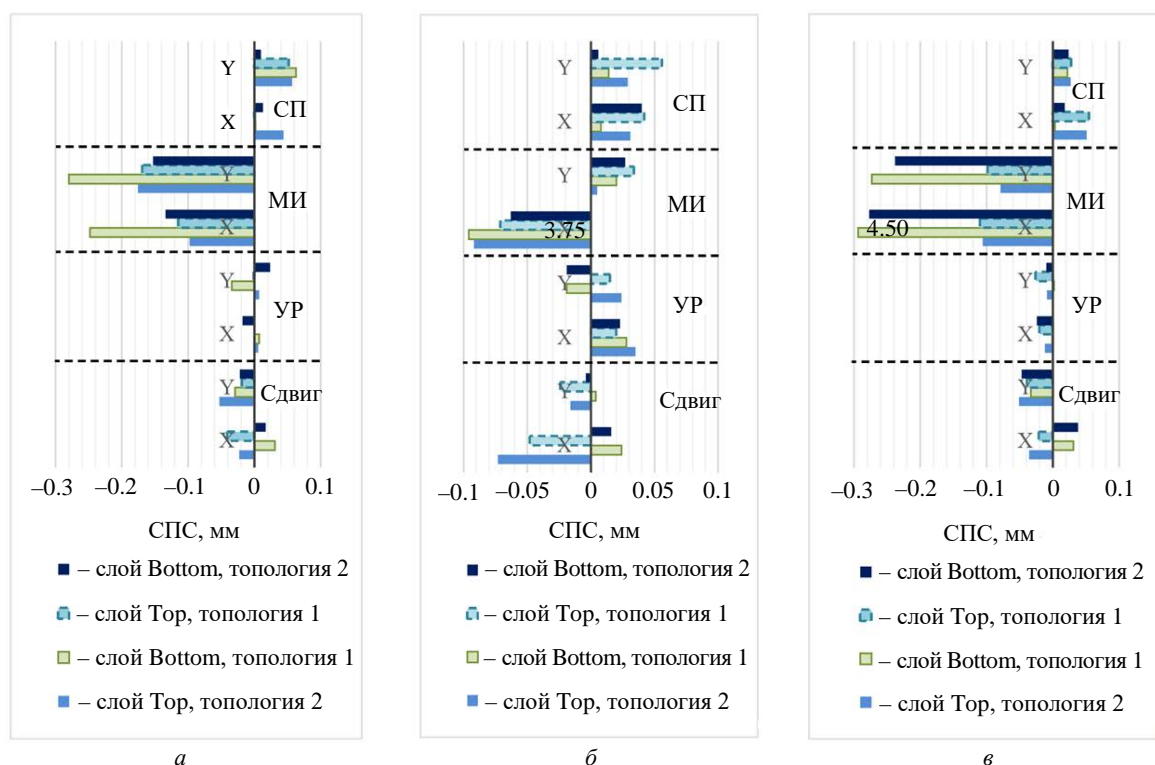


Рис. 8. Результаты декомпозиции отклонений расположения слоев образцов с их 3D-моделями: а – изготовленный без применения операций межслойного совмещения образец с топологией, состоящей из каналов под проводники и отверстий; б – изготовленный с применением одной операции межслойного совмещения образец с топологией, состоящей из каналов под проводники и отверстий; в – изготовленный без применения операций межслойного совмещения образец с топологией, состоящей только из отверстий

Fig. 8. Comparison of the decomposition of sample layers and their 3D-models: а – a sample with vias and channels for traces as topology features manufactured without alignment operations; б – a sample with vias and channels for traces as topology features manufactured with an alignment operation; в – a sample with vias as the only topology feature manufactured without alignment operations

Для оценки отклонений от 3D-модели проведена декомпозиция каждой топологии на каждом слое (рис. 8). На рисунке используются следующие обозначения: СПС – составляющая погрешности совмещения; УР – угловой разворот; МИ – масштабные искажения; СП – случайные погрешности. В результате помимо подтверждения вышеуказанных предположений обнаружено следующее:

- чем ближе топология к центру образца, тем сильнее сжатие;
- слой Bottom имеет большую величину сжатия (усадки) по сравнению со слоем Top;
- наименьший вклад в погрешность совмещения вносит угловой разворот.

Таким образом, независимо от топологии и способа изготовления наблюдаются значительные масштабные искажения слоев, в среднем около 150 мкм для каждого слоя в сравнении с его 3D-моделью и около 60 мкм при сравнении

топологий слоев Top с Bottom, что предположительно связано с температурными градиентами во время печати. Данные значения для одной составляющей погрешности совмещения уже превышают значение, характерное для погрешности совмещения слоев друг с другом при штифтовой технологии совмещения, а именно ± 50 мкм [10], что говорит о необходимости первоочередного контроля температурных воздействий.

Влияние температурных градиентов значительно для способа изготовления без операции межслойного совмещения по причине охлаждения напечатанных слоев во время заполнения каналов проводников проводящим материалом. В пользу данного предположения говорят изображения микрошлифов, на которых поперечное сечение образца представляет собой несколько трапеций с основаниями, верхнее из которых больше нижнего, наложенных друг на друга.

Кроме того, исследования, проведенные с

Оценка погрешности совмещения элементов

проводящего рисунка печатных плат, полученных с помощью 3D-печати

Alignment Error Estimation of the Conductive Pattern of 3D-Printed Circuit Boards

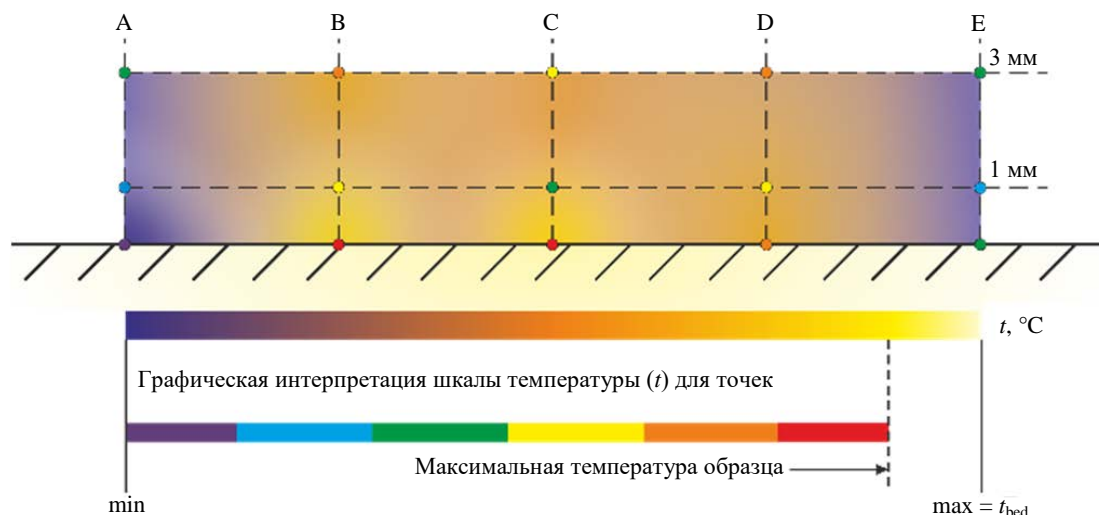


Рис. 9. Неравномерность распределения температуры в сечении образца (за максимальную температуру принято значение температуры РП, t_{bed}) (адаптировано на основе результатов [15])

Fig. 9. Nonuniform temperature distributions in the cross section of a sample (with the maximum accepted temperature being that of the printing platform t_{bed}) (adapted based on [15])

применением тепловизоров [15, 16], наглядно показывают неравномерность теплового профиля образца (рис. 9).

Более низкая температура краев образца по сравнению с центральной частью обуславливается большими потерями тепла из-за конвективно-лучистого переноса, что часто приводит к короблению образца, а именно отсоединению углов образца от РП [15]. Во время печати также происходит теплообмен между соседними растрами, что замедляет усадку последующих печатаемых слоев, приводит к дополнительному сжатию уже напечатанных слоев и вызывает деформации [17]. Математическое описание происходящих явлений широко представлено в [18, 19].

Таким образом, для уменьшения влияния тепловых градиентов на совмещение слоев следует использовать оборудование с термостатируемой рабочей камерой. С этой же целью для способа изготовления с использованием операции межслойного совмещения дополнительно следует перед совмещением нагревать напечатанную часть изделия.

Заключение и выводы. Для количественной оценки погрешности совмещения и последующего сравнения полученного значения с известными значениями для стандартных технологических процессов использован подход к декомпозиции, описанный Ю. Б. Цветковым для изделий электроники. Особенность его применения для 3D-печати заключается в необходи-

мости расчета координат центров ЭПР, которые выступают в качестве исходных данных. Такой подход и используемый в нем математический аппарат являются универсальными и могут быть применены для всех методов 3D-печати ПП.

В результате проведенного исследования установлено, что наибольший вклад в погрешность совмещения вносят масштабные искажения, причем степень усадки слоя Bottom больше, чем слоя Top независимо от топологии и технологического процесса изготовления. В среднем масштабные искажения составляют около 150 мкм для каждого слоя в сравнении с его 3D-моделью и около 60 мкм при сравнении топологий слоев Top с Bottom, что превышает общее значение рассовмещения между двумя слоями в ± 50 мкм, характерное для штифтовой технологии совмещения. Данное явление предположительно связано с температурными градиентами во время печати. Для снижения погрешности совмещения следует использовать 3D-принтеры с термостатируемой рабочей камерой.

Предложенный способ изготовления с использованием операции межслойного совмещения, в основе которого лежит штифтовая система совмещения, может быть применим не только для метода ПНФ, но и для других методов 3D-печати, способом подачи основного материала которых является сопло.

Выявленные погрешности совмещения достаточно большие, чтобы применять рассмотренный метод 3D-печати для изготовления ПП и их маке-

тов выше 3-го класса точности. Для обеспечения изготовления изделий более высокого класса точности следует обратить внимание на 3D-принтеры, способные минимизировать влияние температурных воздействий и имеющие возможность устанавливать экструзионные сопла диаметром, меньшим или равным требуемой ширине проводника. Однако изменение модели оборудования и/или использование других комплектующих к нему может сопровождаться появлением непрогнозируемых погрешностей,

что потребует проведения повторной оценки погрешности совмещения по предложенной в данной статье методике. При использовании других методов 3D-печати, например капельного или аэрозольного нанесения материала, которые потенциально могут обеспечить лучшую топологическую точность относительно метода ПНФ по причине осаждения капель/частиц диаметром менее 100 мкм, предложенная методика оценки погрешностей также будет применима.

Авторский вклад

Смирнова Ольга Николаевна – анализ литературы по теме исследования; разработка методик проведения экспериментов; обработка полученных результатов; обсуждение результатов; подготовка статьи.

Александров Александр Александрович – изготовление экспериментальных образцов; обсуждение результатов; подготовка статьи.

Боброва Юлия Сергеевна – обсуждение результатов, подготовка статьи.

Моисеев Константин Михайлович – постановка задачи; обсуждение результатов; руководство научными исследованиями; подготовка статьи.

Author's contribution

Olga N. Smirnova, literature review; development of research methods; analysis of the experimental results; discussion of the results; preparation of the paper text.

Alexander A. Aleksandrov, manufacturing of experimental samples; discussion of the results; preparation of the paper text.

Yulia S. Bobrova, discussion of the results; preparation of the paper text.

Konstantin M. Moiseev, definition of research scopes; discussion of the results; management of the work; preparation of the paper text.

Список литературы

1. Смирнова О. Н., Боброва Ю. С., Моисеев К. М. Методы 3D-печати для изготовления печатных плат // Электроника: наука, технология, бизнес. 2022. № 8. С. 128–134. doi: 10.22184/1992-4178.2022.219.8.128.136
2. Walpuski B., Sloma M. Accelerated Testing and Reliability of FDM-Based Structural Electronics // Applied sciences. 2022. № 12. 8 p. doi: 10.3390/app12031110
3. Application of 3D Printing for smart objects with embedded electronic sensors and systems / H. Ota, S. Emaminejad, Y. Gao, A. Zhao, E. Wu, S. Challa, K. Chen, H. M. Fahad, A. K. Jha, D. Kiriya, W. Gao, H. Shiraki, K. Morioka, A. R. Ferguson, K. E. Healy, R. W. Davis, A. Javey // Advanced Materials Technologies. 2016. Vol. 1. 22 p. doi: 10.1002/admt.201600013
4. Alsharari M., Chen B., Shu W. 3D Printing of Highly Stretchable and Sensitive Strain Sensors Using Graphene Based Composites // Proceedings. 2018. № 2, iss. 13. 4 p. doi: 10.3390/proceedings2130792
5. Брошюра Ender 3 S1. URL: <https://www.creality.com/products/creality-ender-3-s1-3d-printer?parent-baobab-id=Irajvagadw> (дата обращения: 12.01.2024).
6. ГОСТ Р 53429–2009. Платы печатные. Основные параметры конструкции. М.: Стандартин-

форм, 2018. 11 с.

7. Оценка размерных показателей элементов проводящего рисунка печатных плат, полученных с помощью 3D-печати / О. Н. Смирнова, А. А. Александров, Ю. С. Боброва, К. М. Моисеев // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2023. Т. 26, № 4. С. 81–94. doi: 10.32603/1993-8985-2023-26-4-81-94

8. Fabrication of conductive paths on a fused deposition modeling substrate using inkjet deposition / W. Zhou, F. A. List, C. E. Duty, S. S. Babu // Rapid Prototyping Journal. 2016. Vol. 22, iss. 1. P. 77–86. doi: 10.1108/RPJ-05-2014-0070

9. 3D printed capacitive sensors / C. Shemelya, F. Cedillos, E. Aguilera, E. Maestas, J. Ramos, D. Espalin, D. Muse, R. Wicker, E. MacDonald // IEEE Sensors, Baltimore, USA, 03–06 Nov. 2013. IEEE, 2013. 4 p. doi: 10.1109/ICSENS.2013.6688247

10. Пахнин А. Формирование структуры сложных многослойных печатных плат // Производство электроники: технологии, оборудование, материалы. 2011. № 2. С. 32–39.

11. Семенов П. В., Цветков Ю. Б. Анализ точности базирования при совмещении слоев многослойных печатных плат // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2010. № 11. С. 34–40.

12. ГОСТ ИЕС 61189-3-2013 Методы испытаний электрических материалов, печатных плат и других структур межсоединений и печатных узлов. Ч. 3: Методы испытаний материалов для структур межсоединений (печатных плат). М.: Стандартинформ, 2015. 82 с.

13. Гибсон Я., Розен Д., Стакер Б. Технологии аддитивного производства. Трехмерная печать, быстрое прототипирование и прямое цифровое производство / пер. с англ. под ред. И. В. Шишковского. М.: Техносфера, 2020. 648 с.

14. Цветков Ю. Б. Анализ совмещаемости слоев в производстве изделий микросистемной техники // Микросистемная техника. 2004. № 8. С. 33–38.

15. Ramian J., Ramian J., Dziob D. Thermal Deformations of Thermoplast during 3D Printing: Warping in the Case of ABS // Materials. 2021. № 14. 18 p. doi: 10.3390/ma14227070

16. Zgryza Ł., Raczynska A., Pańnikowska-Łukaszuk M. Thermovisual measurements of 3D print-

ing of ABS and PLA filaments // Advances in Science and Technology – Research Journal. 2018. Vol. 12 (3). P. 266–271. doi: 10.12913/22998624/94325

17. Schmutzler C., Zimmermann A., Zaeh M. F. Compensating warpage of 3D printed parts using free-form deformation // Procedia CIRP. 2016. Vol. 41. P. 1017–1022. doi: 10.1016/j.procir.2015.12.078

18. Thermal analysis of additive manufacturing of large-scale thermoplastic polymer composites / B. G. Compton, B. K. Post, C. E. Duty, L. Love, V. Kunc // Additive Manufacturing, 2017. Vol. 17. P. 77–86. doi: 10.1016/j.addma.2017.07.006

19. Thermal Analysis of Fused Deposition Modeling Process Based Finite Element Method: Simulation and Parametric Study / K. Khanafer, A. Al-Masri, I. Deiab, K. Vafai // Numerical Heat Transfer, Part A: Applications. 2022. Vol. 81. P. 94–118. doi: 10.1080/10407782.2022.2038972

Информация об авторах

Смирнова Ольга Николаевна – аспирант кафедры электронных технологий в машиностроении Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана. Автор 18 научных работ. Сфера научных интересов – печатные платы и печатные узлы в части технологий их изготовления; методы испытаний и контроля.

Адрес: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, Москва, 105005, Россия

E-mail: olga.smirnova.nik@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0004-3625-3250>

Александров Александр Александрович – аспирант кафедры технологий обработки материалов Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана. Автор шести научных публикаций. Сфера научных интересов – аддитивные технологии; лазерные аддитивные технологии; коаксиальное лазерное плавление; исследование технологической прочности жаропрочных сплавов.

Адрес: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, Москва, 105005, Россия

E-mail: alexandrov@bmstu.ru

<https://orcid.org/0009-0009-8980-7866>

Боброва Юлия Сергеевна – инженер-технолог, выпускник кафедры электронных технологий в машиностроении Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана (2006). Автор более 40 научных работ. Сфера научных интересов – технологии изготовления и контроля печатных плат.

Адрес: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, Москва, 105005, Россия

E-mail: ju.s.bobrova@gmail.com

<http://orcid.org/0009-0009-7231-7422>

Моисеев Константин Михайлович – кандидат технических наук (2012), доцент кафедры электронных технологий в машиностроении Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана. Автор более 50 научных работ. Сфера научных интересов – микро- и наноэлектроника; вакуумная и плазменная электроника; вакуумные технологические процессы и оборудование.

Адрес: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, Москва, 105005, Россия

E-mail: k.moiseev@bmstu.ru

<http://orcid.org/0000-0002-8753-7737>

References

1. Smirnova O. N., Bobrova Yu. S., Moiseev K. M. 3D Printing Methods for PCB Manufacturing. Electronics: Science, Technology, Business. 2022, no. 8, pp. 128–134. doi: 10.22184/1992-4178.2022.219.8.128.136 (In Russ.)

2. Walpuski B., Sloma M. Accelerated Testing and Reliability of FDM-Based Structural Electronics. Applied Sciences. 2022, no. 12, 8 p. doi: 10.3390/app12031110

3. Ota H., Emaminejad S., Gao Y., Zhao A., Wu E., Challa S., Chen K., Fahad H. M., Jha A. K., Kiriya D., Gao W., Shiraki H., Morioka K., Ferguson A. R., Healy K. E., Davis R. W., Javey A. Application of 3D

Printing for Smart Objects with Embedded Electronic Sensors and Systems. Advanced Materials Technologies. 2016, vol. 1, 22 p. doi: 10.1002/admt.201600013

4. Alsharari M., Chen B., Shu W. 3D Printing of Highly Stretchable and Sensitive Strain Sensors Using Graphene Based Composites. Proceedings. 2018, no. 2, iss. 13, 4 p. doi: 10.3390/proceedings2130792

5. 3D Printer. Ender 3 S1. Available at: <https://www.creality.com/products/creality-ender-3-s1-3d-printer?parent-baobab-id=lrajvagdww> (accessed 12.01.2024).

6. GOST R 53429–2009. Printed Circuit Boards. Basic Parameters of Structure. Moscow, Standartinform, 2018, 11 p. (In Russ.)
7. Smirnova O. N., Aleksandrov A. A., Bobrova Yu. S., Moiseev K. M. Evaluation of Dimensional Characteristics of Conductive Pattern Elements of 3D-Printed Circuit Boards. *Journal of the Russian Universities. Radioelectronics*. 2023, vol. 26, no. 4, pp. 81–94. doi: 10.32603/1993-8985-2023-26-4-81-94 (In Russ.)
8. Zhou W., List F. A., Duty C. E., Babu S. S. Fabrication of Conductive Paths on a Fused Deposition Modeling Substrate Using Inkjet Deposition. *Rapid Prototyping J.* 2016, vol. 22, iss. 1, pp. 77–86. doi: 10.1108/RPJ-05-2014-0070
9. Shemelya C., Cedillos F., Aguilera E., Maestas E., Ramos J., Espalin D., Muse D., Wicker R., MacDonald E. 3D Printed Capacitive Sensors. *IEEE Sensors*, Baltimore, USA, 03–06 Nov. 2013. IEEE, 2013, 4 p. doi: 10.1109/ICSENS.2013.6688247
10. Pakhnin A. Formation of the Structure of Complex Multilayer Printed Circuit Boards. *Electronics Production: Technologies, Equipment, Materials*. 2011, no. 2, pp. 32–39. (In Russ.)
11. Semenov P. V., Tsvetkov Yu. B. Analysis of Basing Accuracy of Layers Alignment of Multilayer Printed Circuit Boards. *Assembly in Mechanical Engineering, Instrumentation*. 2010, no. 11, pp. 34–40. (In Russ.)
12. GOST IEC 61189-3-2013 Test methods for electrical materials, printed boards and other interconnection structures and assemblies. Pt 3. Test methods for interconnection structures (printed boards). Moscow, Standartinform, 2015, 82 p. (In Russ.)
13. Gibson I., Rosen D., Stucker B. *Additive Manufacturing Technologies. 3D Printing, Rapid Prototyping and Direct Digital Manufacturing*. Second Edition. NY, Springer New York, 2015, 498 p.
14. Tsvetkov Yu. B. Analysis of the Compatibility of Layers in the Production of Microsystem Technology Products. *Microsystem Technology*. 2004, no. 8, pp. 33–38. (In Russ.)
15. Ramian J., Ramian J., Dziob D. Thermal Deformations of Thermoplast during 3D Printing: Warping in the Case of ABS. *Materials*. 2021, no. 14, 18 p. doi: 10.3390/ma14227070
16. Zgryza Ł., Raczynska A., Paśnikowska-Łukaszuk M. Thermovisual Measurements of 3D Printing of ABS and PLA Filaments. *Advances in Science and Technology – Research Journal*. 2018, vol. 12 (3), pp. 266–271. doi: 10.12913/22998624/94325
17. Schmutzler C., Zimmermann A., Zaeha M. F. Compensating Warpage of 3D Printed Parts Using Free-Form Deformation. *Procedia CIRP*. 2016, vol. 41, pp. 1017–1022. doi: 10.1016/j.procir.2015.12.078
18. Compton B. G., Post B. K., Duty C. E., Love L., Kunc V. Thermal Analysis of Additive Manufacturing of Large-Scale Thermoplastic Polymer Composites. *Additive Manufacturing*. 2017, vol. 17, pp. 77–86. doi: 10.1016/j.addma.2017.07.006
19. Khanafer K., Al-Masri A., Deiaf I., Vafai K. Thermal Analysis of Fused Deposition Modeling Process Based Finite Element Method: Simulation and Parametric Study. *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*. 2022, vol. 81, pp. 94–118. doi: 10.1080/10407782.2022.2038972

Information about the authors

Olga N. Smirnova, postgraduate student of the Department of Electronic Engineering Technologies of the Bauman Moscow State Technical University. The author of 18 scientific publications. Area of expertise: printed circuit boards and their assembly; manufacturing technologies; test and control methods.

Address: Bauman Moscow State Technical University, 5, p.1, 2nd Bauman St., Moscow 105005, Russia

E-mail: olga.smirnova.nik@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0004-3625-3250>

Alexander A. Alesandrov, postgraduate student of the Department of Materials processing technologies of the Bauman Moscow State Technical University. The author of 6 scientific publications. Area of expertise: additive technologies; laser additive technologies; coaxial laser melting; study of technological strength of heat-resistant alloys.

Address: Bauman Moscow State Technical University, 5, p.1, 2nd Bauman St., Moscow 105005, Russia

E-mail: alexandrov@bmstu.ru

<https://orcid.org/0009-0009-8980-7866>

Julia S. Bobrova, process engineer, graduate (2006) of the Department of Electronic Engineering Technologies of the Bauman Moscow State Technical University. The author of more than 40 scientific publications. Area of expertise: technologies of manufacturing and control of printed circuit boards.

Address: Bauman Moscow State Technical University, 5, p.1, 2nd Bauman St., Moscow 105005, Russia

E-mail: ju.s.bobrova@gmail.com

<http://orcid.org/0009-0009-7231-7422>

Konstantin M. Moiseev, Cand. Sci. (Eng.) (2012), Senior Lecturer of Department of Electronic Engineering Technologies of the Bauman Moscow State Technical University. The author of more than 50 scientific publications. Area of expertise: micro- and nanoelectronics; vacuum and plasma electronics; vacuum technological processes and equipment.

Address: Bauman Moscow State Technical University, 5, p.1, 2nd Bauman St., Moscow 105005, Russia

E-mail: k.moiseev@bmstu.ru

<http://orcid.org/0000-0002-8753-7737>