

**НОВЫЕ РАДИОЭЛЕКТРОННЫЕ
СИСТЕМЫ И ЭЛЕМЕНТЫ**

УДК 621.3.062

**МЕТАЛЛОГРАФИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ
ПРИ ОБЕСПЕЧЕНИИ КАЧЕСТВА ПРОИЗВОДСТВА
МНОГОСЛОЙНЫХ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ С МЕЖСЛОЙНЫМИ
СОЕДИНЕНИЯМИ В СОСТАВЕ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ**

© 2019 г. Д. С. Воруничев^{1, *}, Э. А. Засовин¹

¹МИРЭА – Российский технологический университет,
Российская Федерация, 119454 Москва, просп. Вернадского, 78

*E-mail: vorunichev@mirea.ru

Поступила в редакцию 12.04.2018 г.

После доработки 01.06.2018 г.

Принята к публикации 11.06.2018 г.

Рассмотрено современное состояние высокотехнологичной радиоэлектронной отрасли на примере продукции специального и двойного назначения. Показаны основные причины отказов космической радиоэлектроники. Дана оценка техническим требованиям современного производства печатных плат как одного из основных способов решения по отказам. Предложен комбинированный метод исследования дефектов и обеспечения качества производства многослойных печатных плат с межслойными соединениями в составе сложных радиоэлектронных систем.

DOI: 10.1134/S0033849419020207

ВВЕДЕНИЕ

Радиоэлектронная отрасль одна из самых высокотехнологичных отраслей России, которая представлена в основном продукцией специального и двойного назначения. К примеру, радиотехнические средства космической аппаратуры, традиционно относятся к высоконаучным, доля затрат на отраслевую науку в отгруженной продукции которой составляет свыше 10%. Радиоэлектроника в составе наземно-космических радиотехнических систем является ключевым звеном с которой связано множество проблем обеспечения безопасности ракетно-космической техники, риски катастроф, аварий, отказов ракет-носителей и космических летательных аппаратов [1].

Высокая степень наукоемкости, конструктивная и технологическая сложность радиоэлектронных средств космической аппаратуры обуславливают риски и угрозы безопасности ракетно-космической техники на всех этапах жизненного цикла [2].

**1. АНАЛИЗ ПРИЧИН ОТКАЗОВ
И ОЦЕНКА ТЕХНИЧЕСКИХ ТРЕБОВАНИЙ
К СОВРЕМЕННОМУ ПРОИЗВОДСТВУ
ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ**

Анализ статистики причин и последствий отказов космических аппаратов показывает, что основная их доля приходится на радиоаппаратуру

(табл. 1), в которой чаще всего происходят отказы элементной базы и печатных плат (табл. 2).

Поскольку основные риски и причины отказов закладываются на этапе производства, одной из важнейших задач обеспечения качества является анализ и испытание для подтверждения соответствия перспективным требованиям многослойных печатных плат (МПП) с межслойными соединениями, которые составляют основу современной радиоаппаратуры космического назначения.

Мировой опыт показывает, что высокотехнологичная продукция редко имеет возможность обеспечения каждого этапа производственного процесса. Компании специализируются на одном бизнес-процессе. В настоящее время выделяют две бизнес-модели производства электроники.

1. Собственное производство – производственный цикл от маркетинга до поставки продукции происходит в рамках одного предприятия. Осуществляется выпуск собственной продукции.

2. Контрактное производство – независимая организация, которая на собственных мощностях производит продукцию по заказу (контракту). Изделие изготавливается и соответствует конструкторской документации заказчика. Как правило, собственная продукция не производится.

Технический уровень современного производства печатных плат должен обеспечивать их изго-

Таблица 1. Виды отказов космических аппаратов за 2007–2017 гг.

Место отказа	Фатальный отказ	Частичный отказ	Парированный отказ/сбой	Всего
Радиоаппаратура	20	11	0	31
Программные средства	3	2	16	21
Система электроснабжения	15	3	2	20
Механическая неисправность	5	8	2	15
Аппаратные средства	3	0	3	6
Гироскопические устройства	–	2	3	5
Двигательная установка	2	2	0	4
Ошибка обслуживающего персонала	1	0	0	1
ВСЕГО	49	28	26	103

товление со стабильными характеристиками в соответствии с конструкторской документацией. Технический уровень конкретного производства определяется значением коэффициента технического уровня предприятия, расчет которого ведется по методики национального стандарта ГОСТ Р

53432-2009 [3], требования которого распространены на организации и предприятия, изготавливающие печатные платы для использования в радиоэлектронной аппаратуре. Оценка коэффициента технического уровня производителя печатных плат производится по пяти показателям.

1. Технологическая	Технологические возможности.
2. Производственная	Класс точности изготавливаемых печатных плат
3. Техническое состояние оборудования	Производственные мощности по выпуску МПП
4. Маска под пайку	Срок службы.
	Степень износа
5. Технический уровень кадров	Применение защитной маски.
	Отсутствие защитной маски
	Процент сотрудников, прошедших переподготовку за год

Коэффициент технического уровня (КТУ) производителя печатных плат определяют как сумму баллов (по ГОСТ Р 53432-2009) по формуле

$$\text{КТУ} = B_1 + B_2 + B_3 + B_4 + B_5, \quad (1)$$

где $B_1 \dots B_5$ – оценка показателя группы, баллы.

Для оценок повторяемости, воспроизводимости и правильности технологического процесса изготовления многослойных печатных плат (МПП) применяется следующее уравнение статистической модели:

$$y = \mu + \delta + B + \sum c_i x_i' + e, \quad (2)$$

где y – результат измерений, относительно которого предполагается, что он может быть вычислен по соответствующей функции; μ – (неизвестное) математическое ожидание идеальных результатов; δ – смещение, присущее методу измерений; B – лабораторная составляющая смещения; x_i' – от-

клонение от номинального значения x_i ; c_i – коэффициент чувствительности, равный $\partial y / \partial x_i$; e – случайная погрешность в условиях повторяемости.

Предполагается, что B и e подчиняются нормальному распределению.

2. МЕТАЛЛОГРАФИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МПП С МЕЖСЛОЙНЫМИ СОЕДИНЕНИЯМИ

В радиоэлектронных системах, в том числе специального и двойного назначения, чаще всего происходят отказы следующих элементов:

1) элементная база (в том числе не предназначенная для эксплуатации в заданных условиях или выполненная по бессвинцовой технологии [4]);

2) печатная плата и проводящий рисунок.

Продолжающееся усложнение современной радиоэлектронной аппаратуры и ее элементов,

Таблица 2. Классификация рисков и проблем безопасности для космической радиоэлектронной аппаратуры по уровням конструкторской иерархии

Конструкторская иерархия	Описание	Причины отказов
Наземно-космическая радиотехническая система	Комплекс управления космическими аппаратами включает в себя бортовой комплекс управления (бортовой сегмент) и наземный комплекс управления (наземный сегмент)	– отказы космических аппаратов – отказы радиоаппаратуры – отказы систем управления – отказы аппаратных средств бортовых компьютеров – отказы программных средств бортовых компьютеров
Электронный модуль третьего уровня	Шкаф с установленными в него блоками электронной и радиоэлектронной аппаратурой	– отказы системы электропитания и кабельных систем – отказы радиоаппаратуры
Электронный модуль второго уровня	Блок, основными конструктивными элементами которого является панель с печатными узлами, размещенными в один или несколько рядов	– отказы печатных плат – отказы элементной базы
Электронный модуль первого уровня	Печатная плата, на которой установлена элементная база и соединители	– отказы элементной базы – отказы соединителей и разъемов – отказы печатной платы и проводящего рисунка – отказы разъемных и неразъемных соединений
Электронный модуль нулевого уровня	Электрорадиоэлементы, в том числе интегральные микросхемы и микросборки	– отказы элементной базы

одновременно с тенденцией по микроминиатюризации вынуждает разработчиков все чаще переходить на сложные многослойные и повышенной плотности печатные платы. Усложняются и методы контроля печатных плат. Особенно в части наиболее достоверного контроля металлизации МПП с межслойными соединениями. Самый доступный на сегодняшний день метод исследования и контроля металлизации – металлографический анализ металлизации при помощи микрошлифов. Металлографические исследования по соответствующим методикам позволяют с максимальной достоверной точностью выявлять различные дефекты: нарушение формы геометрии элементов проводящего рисунка, подтравы металлизации, сколы, разрывы металлизации, полости и другие дефекты.

Поскольку спектр возможных дефектов широк, то возникают различные задачи [5, 6]: 1) наблюдение малококонтрастных элементов, чаще носящих скрытый характер (закись меди, наличие включений, царапин, разрывов); 2) наблюдение

высококонтрастных элементов, поглощающих свет (дефекты металлизации, сколы, разрывы, полости).

Для металлографического исследования различных по характеру дефектов, предлагается использовать комбинацию из двух методов: исследование в светлом и темном поле [6]. Примеры исследования микрошлифов МПП с различными дефектами приведены на рис. 1–3. Исследование проводилось с помощью металлографического микровизора μ Vizo-MET-221 с линейным увеличением от 10 до 4000 крат, методами “работа в темном поле” и “работа в светлом поле”. Для диагностики межслойных соединений плат применялось увеличение от 50...200 крат, которое позволяло при необходимости достигать точности измерения толщины металлизации покрытий ± 0.7 мкм (при тщательном соблюдении всех требований к изготовлению микрошлифов). Исследовано 20 различных типов конструкций МПП с различным количеством слоев.

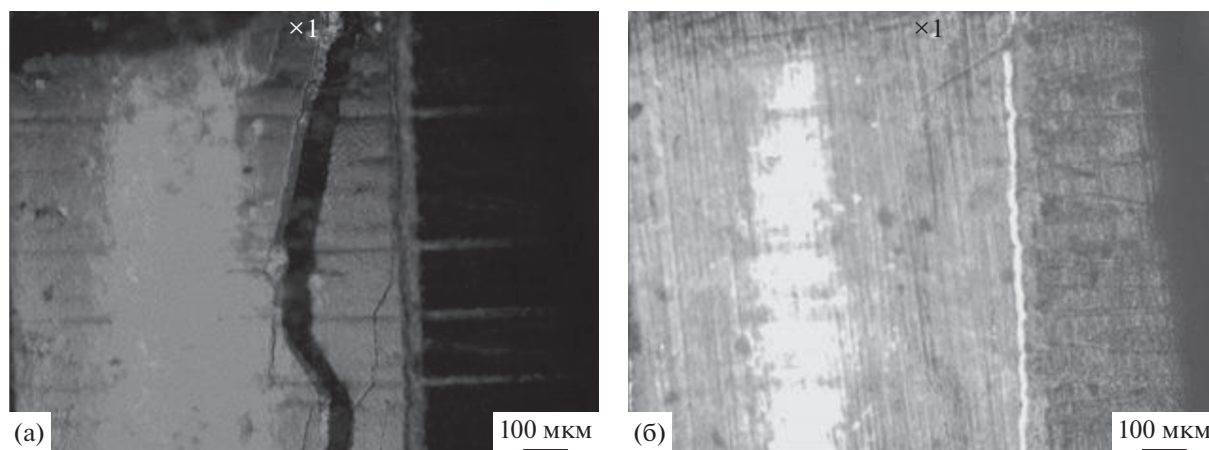


Рис. 1. Разрыв сквозного металлизированного отверстия: а – метод “работа в темном поле”; б – метод “работа в светлом поле”.

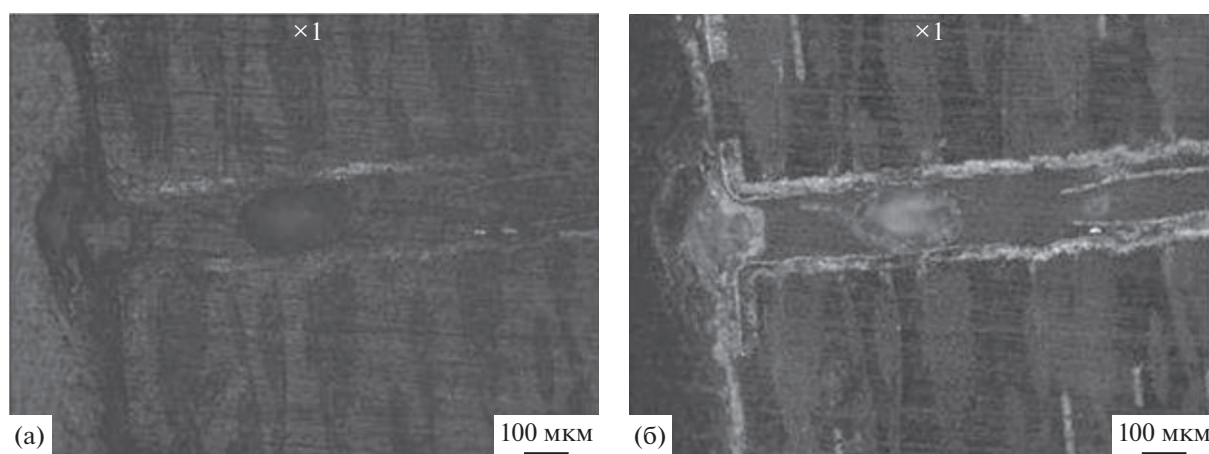


Рис. 2. Полость в металлизированном отверстии и окись меди: а – метод “работа в темном поле”; б – метод “работа в светлом поле”.

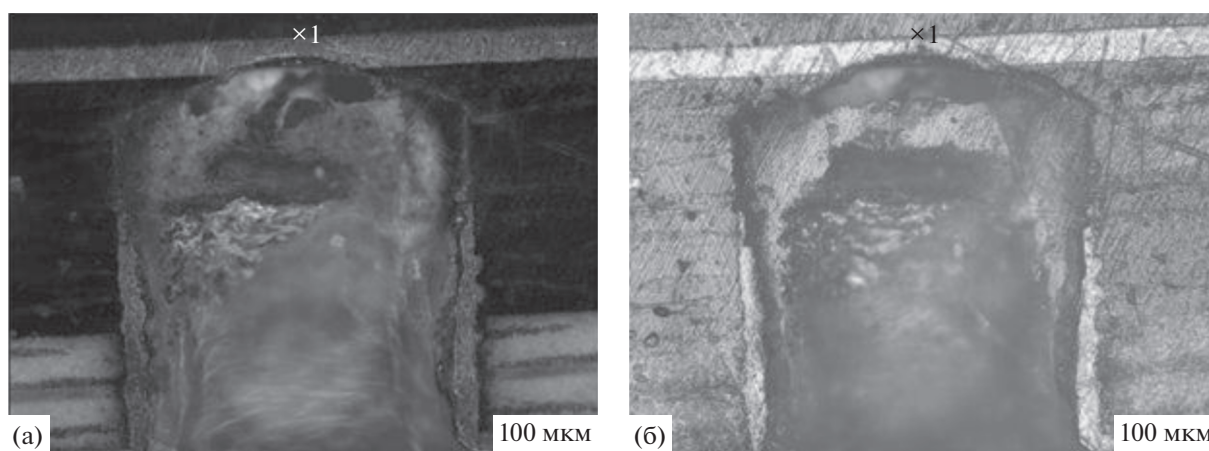


Рис. 3. Нарушение электрического соединения в глухом отверстии: а – метод “работа в темном поле”; б – метод “работа в светлом поле”.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, представлена статистика по отказам сложных радиоэлектронных систем по уровням конструкторской иерархии. Наибольшее число отказов приходится на элементную базу и проводящий рисунок печатных плат. Учитывая широкий спектр возможных производственных дефектов проводящего рисунка плат, предложен комбинированный металлографический метод исследования, заключающийся в проведении оптического контроля слоев плат двумя методами работы: в светлом и темном поле. Сочетание двух методов исследования позволило с высокой достоверностью наблюдать как малоконтрастные, так и высококонтрастные элементы, поглощающие свет по микрошлифам.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Воруничев Д.С.* // Матер. Междунар. науч.-техн. конф. "INTERMATIC-2016". М.: МИРЭА, 2016. С. 221.
2. *Воруничев Д.С.* // Стандарты и качество. 2016. № 1. С. 53.
3. ГОСТ Р 53432-2009. Платы печатные. Общие технические требования к производству. М.: Стандартинформ, 2009.
4. *Воруничев Д.С., Покровская М.В.* // Вестник РГРТУ. 2014. № 4 (вып. 50). Ч. 2. С. 107.
5. *Худак Ю.И.* // Рос. технол. журн. 2017. Т. 5. № 3. URL: https://rtj.mirea.ru/upload/medialibrary/924/rtzh_3_2017_full.pdf.
6. *Костин М.С., Воруничев Д.С.* Реинжиниринг радиоэлектронных средств: монография. М.: МИРЭА, 2018.