

Некоторые особенности технологии производства современных многокристальных микросборок и «систем в корпусе» типа МКМ-К

Одним из наиболее востребованных на российском рынке типов электронных приборов, которые производятся нашей электронной промышленностью, являются устройства, работающие в сложных условиях эксплуатации, при повышенных требованиях к надежности и мобильности. Существует две причины, обусловившие это явление: первая — это очень высокий уровень компетенции и накопленный многолетний опыт российских разработчиков и производителей аппаратуры в данной области. Вторая причина связана со специфической направленностью таких устройств на военные применения, в том числе относящиеся к безопасности государства. И как следствие этого — закрытость от иностранных производителей, а также высокие риски, обусловленные повышенными требованиями к надежности и безотказности работы аппаратуры.

Андрей Хохлун
Владимир Бейль

micro@ostec-group.ru

Введение

Кроме того, существует четко выраженная тенденция роста доли ВЧ- и СВЧ-применений в общемировом рынке электроники (лавинообразное развитие телекоммуникаций, мобильных и портативных устройств, гражданского и промышленного рынка), что делает соответствующие типы приборов массовыми. Специальные применения также динамично развиваются в направлении повышения рабочих частот и энергоэффективности, приобретения новых свойств, снижения массы и габаритов.

Вместе с тем необходимо отметить наметившуюся в последние десятилетия тенденцию отставания российской отрасли разработки и производства промышленных и специальных приборов и систем высокой надежности и мобильности. Если еще совсем недавно отечественные специалисты в этой области шли практически вровень со специалистами США и Японии, при этом активно обучая корейских, тайваньских и китайских производителей, то сейчас ситуация значительно изменилась. Чтобы не потерять и расширить отечественный рынок специальных применений, необходимо активно развивать это направление, внедряя самые прогрессивные технологии и передовой мировой опыт.

В статье мы оставим за рамками рассмотрения производство цифровых и аналоговых приборов на кремниевых структурах, МЭМС, СВЧ-кристаллов (МИС и дискретных приборов) и сфокусируемся на вопросах технологии микросборки и корпусирования, которые во многих случаях оказываются ключевыми в производстве современных приборов специального применения.

Современные многокристальные модули (МКМ) и микросборки — «системы в корпусе» для спецприменений

В современной электронной технике все более отчетливо прослеживается тенденция миниатюризации и интеграции. В отличие от дискретной цифровой техники, где до последнего времени интеграция в основном наблюдалась на уровне кристаллов, в комплексных системах, когда в одном устройстве могут быть соединены цифровые и аналоговые ИС, пассивные компоненты, МЭМС и МОЭМС, СВЧ приемопередающие устройства, эти процессы идут практически параллельно как на кристалльном уровне, так и на уровне систем в корпусе (SIP). Еще некоторое время назад типовые конструкции ВЧ- и СВЧ-модулей, конструктивно выполненные на основе набора поликорковых или ситалловых подложек, размещенных в достаточно массивном металлическом корпусе и соединенных между собой паяными или сварными соединениями, устраивали потребителей в области авионики, аэрокосмической техники и мобильных приложений. Однако сейчас, с появлением новых технологий корпусирования, идет быстрая замена устройств из этого сегмента электроники на современную компонентную базу.

Одним из самых перспективных типов современных микросборок для спецприменений являются многокристальные модули на основе керамики (МКМ-К, или МСМ-С — латинская аббревиатура). На рис. 1 представлен многокристальный модуль на керамическом основании с внешними выводами типа PGA.

Процесс создания современного многокристального модуля типа МКМ-К включает в себя несколько

обязательных стадий проектирования, подготовки производства и тестирования изготовленных образцов. Судя по блок-схеме, приведенной на рис. 2, процесс проектирования и производства МКМ-К состоит из следующих основных частей:

- определение и согласование требований заказчика;
- проектирование и моделирование схмотехники;
- проектирование и моделирование топологии корпусов и подложек;
- изготовление керамического многослойного корпуса и вспомогательных подложек;
- изготовление, подготовка и тестирование заведомо годных кристаллов и компонентов;
- микросборка и герметизация модуля с операциями межоперационного контроля;
- финишное тестирование и проведение комплексных испытаний функционирования и надежности;
- предъявление системы на основе МКМ-К заказчику.

Типовое техническое задание на разработку МКМ-К должно включать в себя информацию по следующим группам:

- Электрические требования: функциональная блок-схема, электрическая принципиальная схема, таблица входов/выходов, требования к импедансам, волновым потерям, нагрузкам и полосам частот.
- Механические требования: требования к размерам и массе МКМ-К, требования к тепловым и механическим интерфейсам, тип, количество, геометрия и расположение выводов; требования, предъявляемые согласно операциям последующей сборки.
- Требования среды и условий эксплуатации: требования к ударам, ускорениям и вибрации, температура эксплуатации, герметичность, требования к внутренней атмосфере и давлению; требования к хранению и транспортировке.
- Требования к испытаниям: электрические, тепловые, требования к прогону при повышенной температуре и ускоренному старению, требования к ударам и вибрации.
- Дополнительные требования заказчика: требования к документации, стоимости изделия, серийность и другие.

При разработке конструкции и технологии изготовления МКМ-К с целью обеспечения технологичности изделия очень важно с самого начала закладывать в конструктив решения, соответствующие требованиям стандартов и рабочих инструкций предприятия-изготовителя.

Некоторые типовые требования к конструктивным элементам МКМ-К приведены на рис. 3 и в таблице.

Для повышения тепловых характеристик МКМ-К критичные компоненты часто размещаются в специальных полостях, что позволяет уменьшить толщину теплоотводящего материала под кристаллом и получить существенный выигрыш по сравнению с тепловыми характеристиками простой подложки. Такая полость показана на рис. 3. Минимальные и номиналь-

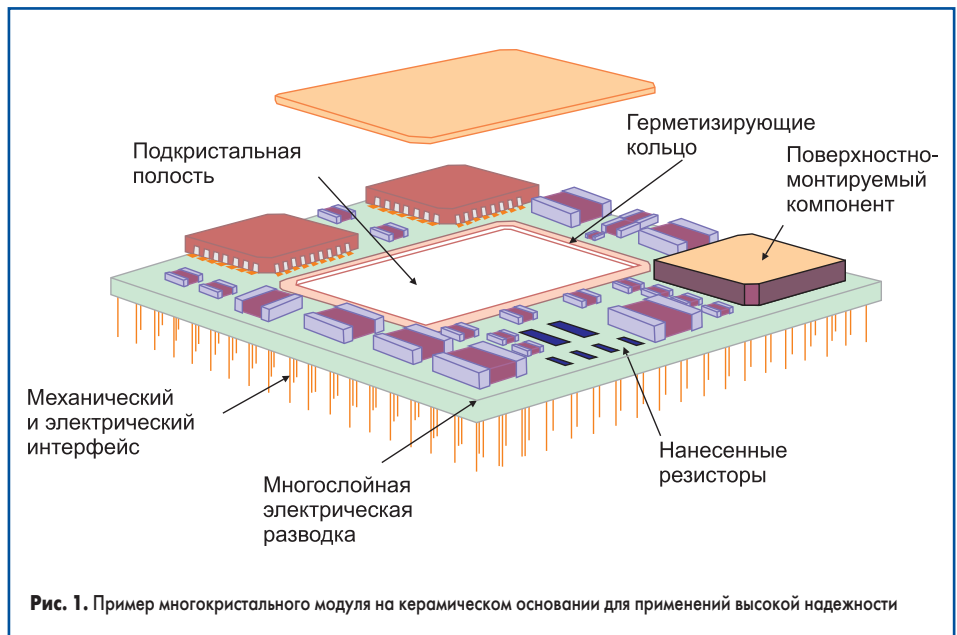


Рис. 1. Пример многокристального модуля на керамическом основании для применений высокой надежности

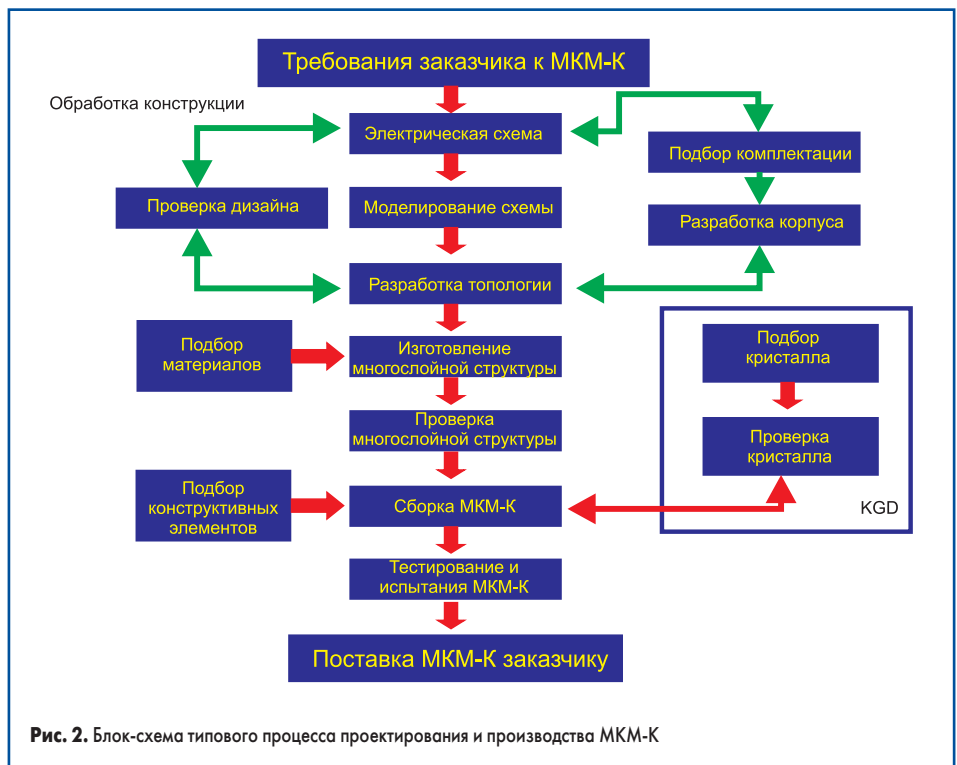


Рис. 2. Блок-схема типового процесса проектирования и производства МКМ-К

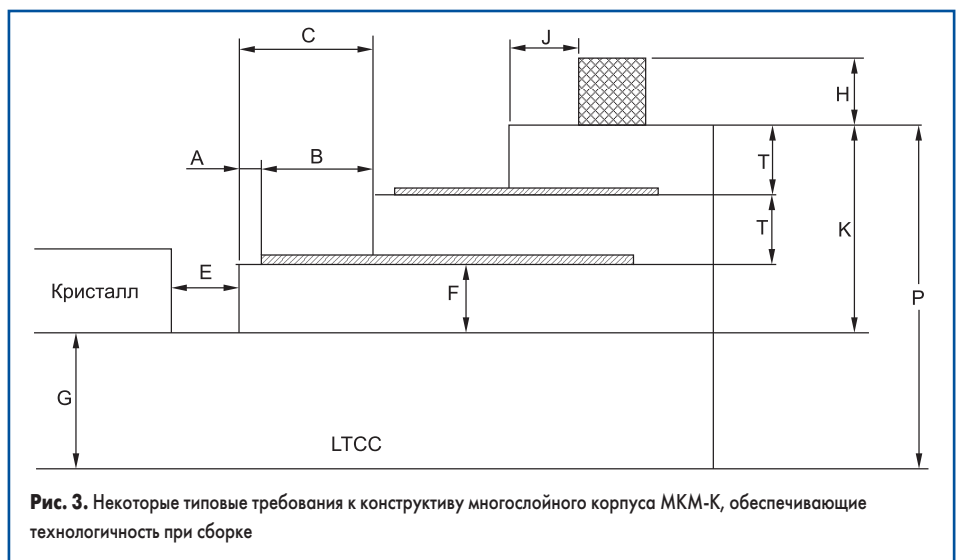


Рис. 3. Некоторые типовые требования к конструктиву многослойного корпуса МКМ-К, обеспечивающие технологичность при сборке

Таблица. Минимальные и номинальные размеры подложки и полости

Параметр	Минимальный или типичный размер, мм	Обозначение в соответствии с рис. 3
Толщина корпуса после спекания	1,52 min	P
Толщина LTCC-структуры на дне полости	1,02 min	G
Глубина полости	Не определена	K
Высота первой контактной площадки	F = высота кристалла ±0,25 для одноступенчатого варианта и высота кристалла — 0,25 для многоступенчатого варианта	F
Расстояние от края кристалла до края полости	0,25 min 0,50 типично	E
Длина контактной площадки (для дизайна с полостью) $B = C - A$	0,38 min	B
Высота уплотнительного кольца (min) = высота кристалла (max) - K + M, где: M = высота петли + 0,25 (min) для обеспечения зазора под крышкой	0,50 min	H
Высота петли для золотой проволоки диаметром 0,025	0,25 типично	
Высота петли для золотой проволоки диаметром 0,127	0,76 типично	
Расстояние от края полости до уплотнительного кольца (min)	0,5 min 0,76 типично	J
Длина ступеньки $C = (A+D) + [T/\tan \Theta]$	0,76 типично	C
Отступ контактной площадки	0,08 min	A
Длина контактной площадки для выполнения сварного соединения	0,25 min	D
Высота ступеньки = суммарная толщина слоев LTCC после спекания	Не нормируется	T
Угол инструмента для УЗ-сварки	70°	f

ные размеры подложки и полости приведены в таблице. Все размеры подложки представлены после процесса спекания и приведены в миллиметрах, за исключением особо отмеченных. В параметры полости подложки входят: толщина спекаемого модуля, толщина нижней части полости LTCC, глубина полости, высота выступа, расстояние от края кристалла до границы полости, высота герметизирующего кольца, расстояние от края полости до герметизирующего кольца и длина выступа полости.

При проектировании МКМ-К требуется описание каждого уникального компонента. Характеристики компонентов очень важны, поскольку включают такие параметры, как длина, ширина и толщина каждого элемента. Информация о размере контактных площадок, шаге и составе материала необходима для формирования топологии и сборки. На чертеже топологии нужно указывать местоположение всех контактных площадок и смысловые названия. Эта информация должна быть представлена в виде фотографии кристалла или чертежа в масштабе. Знание информации о типе технологии производства кристалла необходимо для формирования процессов сборки, транспортировки и тестирования. Она включает в себя такие параметры, как используемый полупроводниковый материал, тип логики и сведения о методе пассивации кристалла.

Способ монтажа кристалла сильно влияет на тепловое сопротивление между кристаллом и подложкой LTCC. Для монтажа кристаллов с возможностью повторной установки в МКМ-К используются электропроводные и изолирующие эпоксидные смолы, а также термопластичные клеи. Информация о металлизации нижней поверхности кристалла необходима для определения параметров установки кристалла. В зависимости от того, какое напряжение на нижней поверхности кристалла, он может быть подсоединен как контакт либо оставаться под плавающим потенциалом. Как и в случае с установкой кристалла, методы монтажа пассивных компонентов и выбор материала также могут сильно повлиять на тепловые характеристики.

Компоненты должны быть размещены на подложке таким образом, чтобы обеспечить достаточно места для монтажа и разводки. Местоположение компонентов должно подразумевать наиболее короткие расстояния межсоединений. Для СВЧ-сигналов длина и форма межсоединений требуют особого внимания. Электрические соединения «кристалл – подложка» развариваются проволокой между соответствующими контактами кристалла и подложки. Стандарты и рабочие инструкции предприятия должны описывать критерии технологичности производства и показывать физические ограничения размера и шага контактных площадок, длины и формы петли, величину допустимой нагрузки и процедуры восстановления.

Обычно поверхностно-монтируемые компоненты представляют собой безвыводные пассивные и активные приборы, индуктивности, резисторы и конденсаторы. Межсоединения для них располагаются во внутренних слоях подложки. Контактные площадки для поверхностного монтажа должны быть качественно пропечатаны, чтобы избежать отсутствия припоя. Припой и пасты для монтажа должны быть совместимы с металлизацией подложки

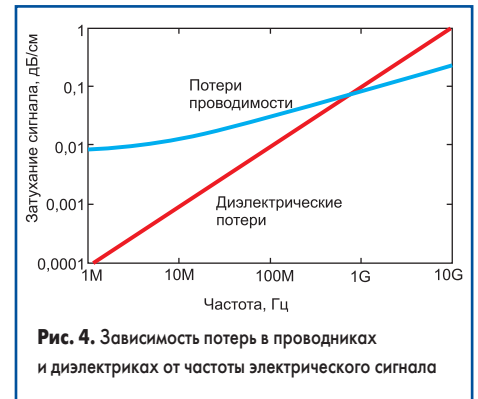


Рис. 4. Зависимость потерь в проводниках и диэлектриках от частоты электрического сигнала

и материалами компонентов. Наноситься они могут трафаретной печатью, автоматическим дозированием либо как преформы. Пайка компонентов осуществляется в конвекционных или инфракрасных печах либо в камерах для парофазной пайки.

Еще одним важнейшим аспектом при принятии решения по конструкции МКМ-К является выбор керамических материалов и металлизационных паст. Особенно актуальным этот аспект становится при повышении рабочих частот, когда диэлектрические потери в проводниках становятся меньше потерь в изоляционном материале (рис. 4). В частотном диапазоне выше 1 ГГц современным материалом, удовлетворяющим требованиям по минимизации потерь и паразитных каналов в СВЧ-схемах, является LTCC-керамика. По своим свойствам она приближается к ситаллу и поликору самого высокого качества и значительно превосходит традиционные печатные платы. Важнейшими особенностями использования LTCC-керамики по сравнению с традиционной высокотемпературной керамикой являются широкие возможности создания многослойных структур и применение металлизационных паст с хорошими электропроводными свойствами, а также снижение температуры при производстве керамики.

Технологический процесс сборки МКМ-К

Рассмотрим особенности типового технологического маршрута сборки МКМ-К, который представлен на рис. 5 на примере субмодуля

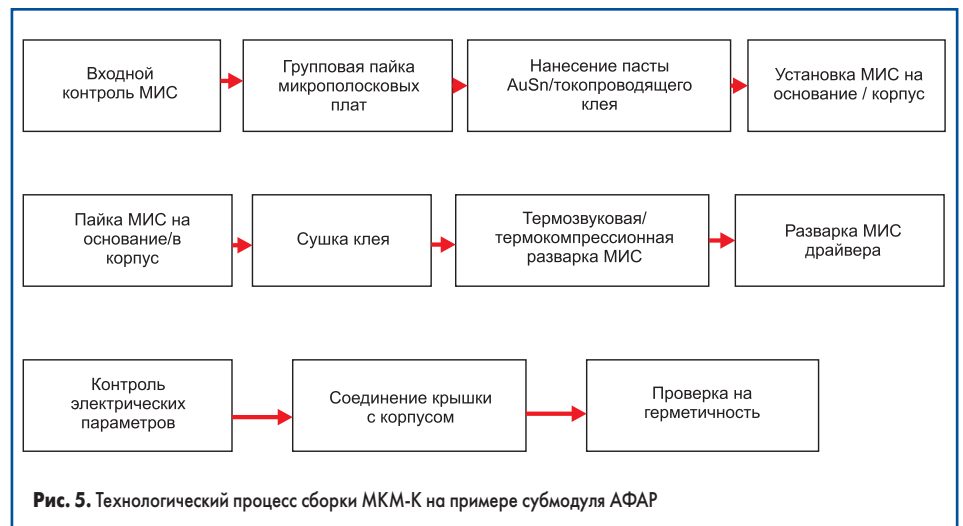


Рис. 5. Технологический процесс сборки МКМ-К на примере субмодуля АФАР

АФАР X-диапазона. Типичные приемопередающие модули, работающие в X-диапазоне, должны обеспечивать около 10 Вт импульсной мощности и 1–3 Вт средней, рабочая полоса может превышать 30%. Решить такую задачу можно только при миниатюризации отдельных составных частей модуля с применением монолитных интегральных схем (МИС СВЧ). Приемопередающие модули для АФАР могут содержать несколько десятков монолитных схем (усилителей СВЧ, мощных транзисторов, малошумящих транзисторов, фазовращателей, аттенуаторов), смонтированных в одном корпусе.

При разработке технологических процессов сборки таких модулей необходимо исходить из того, что в качестве активных компонентов используются кристаллы полевых транзисторов и монолитные интегральные схемы (МИС), выполненные на арсениде галлия. Монолитные интегральные схемы повышенного уровня выходной мощности ($P_{\text{вых}} = 1\text{--}10\text{ Вт}$) при относительно большой площади (12 мм^2) имеют очень малую толщину (50 мкм) — для обеспечения максимального теплоотвода при работе в штатном режиме. При этом технологические процессы монтажа и применяемые для этого материалы должны обеспечивать заданный уровень отвода тепла от таких МИС и быть согласованы между собой по ТКЛР.

Конструкция СВЧ-субмодулей АФАР предусматривает в процессе сборки проведение ступенчатой пайки, причем каждая последующая пайка проводится при температуре ниже предыдущей, максимальная же температура пайки ограничена максимально допустимой температурой нагрева монтируемых компонентов. Так, пайка микрополосковых плат на основания проводится на первой стадии сборки с применением эвтектического припоя AuSi ($T_{\text{плавления}} = 378\text{ °C}$) при температуре 410...420 °C. Максимально допустимая температура нагрева микрополосковых плат согласно ТУ не должна превышать 450 °C. Пайка кристаллов СВЧ-транзисторов и МИС, расположенных один за другим в ряд, осуществляется эвтектическим припоем AuSn ($T_{\text{плавления}} = 280\text{ °C}$) при температуре 300...320 °C. Количество активных компонентов, паяемых за один технологический цикл в данном варианте, определяется в каждом конкретном случае и ограничивается лишь временным фактором.

С точки зрения технологичности, удобства работы и сокращения времени нагрева активных компонентов в процессе монтажа СВЧ-субмодулей возможно нанесение припоя AuSn в виде пасты. В этом случае припой в места установки активных компонентов наносится строго в дозированном количестве при помощи прецизионного дозатора для нанесения паст и клеев.

Установка активных компонентов СВЧ-субмодулей на основания и в корпуса может производиться и при помощи токопроводящего клея марки ЭЧЭ-С или аналогичного типа. В этом случае клей должен наноситься на места установки компонентов также при

помощи прецизионного дозатора. После установки всех активных и пассивных компонентов (ряд конструкций предусматривает на первой стадии монтажа пайку в корпус микрополосковых плат, чип-конденсаторов и драйверов) СВЧ-субмодули поступают на операцию микросварки. В качестве основного способа микросварки СВЧ-транзисторов и МИС принята термозвуковая микросварка с использованием золотой проволоки. Процесс микросварки осуществляется при температуре общего подогрева до 150...180 °C с приложением к сварочному инструменту ультразвуковых колебаний малого (1–1,3 Вт) уровня мощности. В зависимости от размеров контактных площадок СВЧ-транзисторов и МИС используется золотая проволока диаметром 18, 20, 25 и 30 мкм.

Технологический маршрут изготовления СВЧ-субмодулей предусматривает как оперативный контроль выполненных работ непосредственно исполнителем, так и межоперационный контроль. Основной вид контроля — визуальный на соответствие чертежу и требованиям операционных карт технологических процессов. Визуальный контроль должен осуществляться на специально оборудованном рабочем месте. Некоторые виды типовых дефектов, выявляемых методами визуального контроля в соответствии с РИ предприятия, приведены на рис. 6.

Поскольку к СВЧ-субмодулям предъявляются очень жесткие требования по надежности и стойкости к воздействию внешних факторов, особое внимание при разработке технологических процессов сборки уделяется контролю степени герметичности. С помощью техники проверки герметичности необходимо обнаруживать как относительно грубые течи в корпусах, так и весьма малые, что гарантирует невозможность проникновения внутрь негерметичных корпусов вредных загрязне-

ний, влаги и т. п. Испытания на герметичность СВЧ-субмодулей рекомендуется проводить в два этапа:

- На первом этапе высокочувствительными методами анализа отбраковывать приборы с течами менее $10^{-8}\text{ м}^3\cdot\text{Па}/\text{с}$, например масс-спектрометрическим методом.
- На втором этапе выявлять грубые течи, например по образованию пузырьков при погружении СВЧ-субмодуля в жидкость. В зависимости от используемой жидкости и допустимой для изделия температуры максимальная чувствительность метода может достигать $10^{-6}\text{--}5\times 10^{-7}\text{ м}^3\cdot\text{Па}/\text{с}$.

Межоперационное хранение субмодулей осуществляется в специальных шкафах в атмосфере осушенного азота.

Перед окончательной упаковкой, после завершения полного цикла испытаний на субмодули лазером наносится согласованная с заказчиком маркировка.

Заключение

И в завершение статьи, касающейся столь обширной и требующей внимания темы, как производство отечественной электроники и компонентной базы специального назначения, хотелось бы еще раз заострить внимание на очевидной необходимости ускоренного внедрения в отрасль современных технологий, оборудования и материалов с целью обеспечения конкурентоспособности выпускаемой продукции. Кроме того, необходимо совершенствовать имеющиеся и разрабатывать новые рабочие инструкции на уровне стандартов предприятия для применения новых технологий, повышения выхода годных, повторяемости и прослеживаемости производственных процессов и повышения качества выпускаемой продукции.

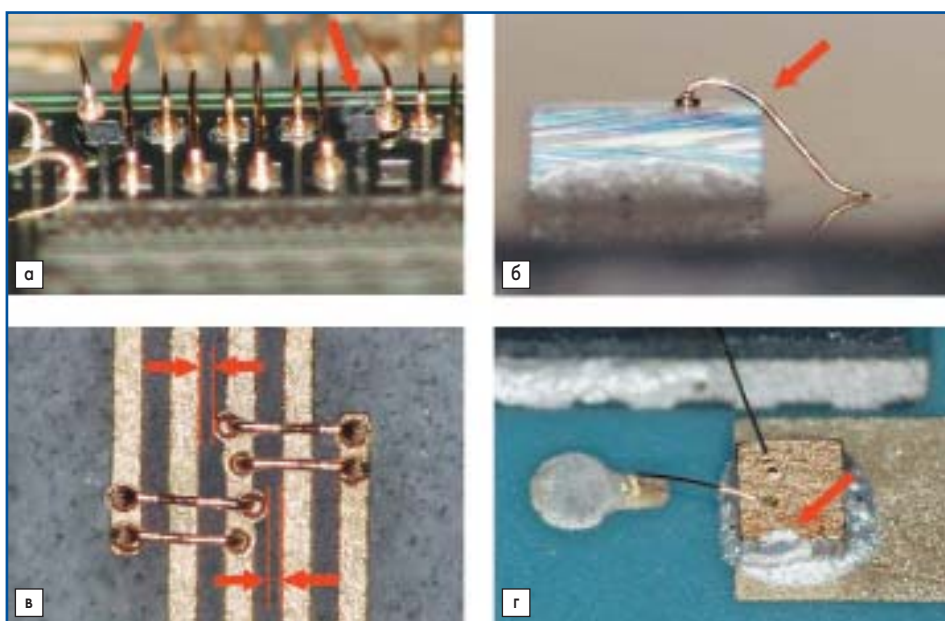


Рис. 6. Некоторые примеры дефектов, выявляемых при визуальном контроле МКМ-К: а) отслоение вывода или перемычки; б) форма петли, допускающая возможность контакта с элементом конструкции; в) при разварке мостов Ланге сварная точка выступает за пределы полоски более чем на 10%; г) токопроводящий клей выходит на лицевую сторону кристалла