

Технологические аспекты непаяных соединений, выполняемых запрессовкой

Одним из важнейших факторов, определяющих качество и надежность радиоэлектронной аппаратуры (РЭА), являются соединения. В наши дни проблема качества и надежности соединений занимает одно из первых мест при разработке и изготовлении РЭА. Поэтому в последние годы в дополнение к традиционным паяным соединениям появились альтернативные непаяные соединения, лишенные проблем, связанных с применением припоя.

Фёдор Плотников

plotnikov@argon.ru

Одним из наиболее эффективных и перспективных видов непаяных соединений являются соединения, выполняемые запрессовкой.

Благодаря своим преимуществам, эта технология завоевала популярность во всем мире и в настоящее время быстро проникает на российский рынок. Это обстоятельство говорит не только в пользу обращения более пристального внимания на новую тенденцию, но и о необходимости более тщательного изучения всех ее положительных и отрицательных сторон.

Исходя из актуальности имеющихся проблем, в статье предлагается рассмотреть следующие технологические аспекты соединений, выполняемых запрессовкой:

- Характер внедрения контактов в сквозное металлизированное отверстие.
- Характер вскрытия поверхностного слоя.
- Степень герметичности места электрического контакта.

Введение

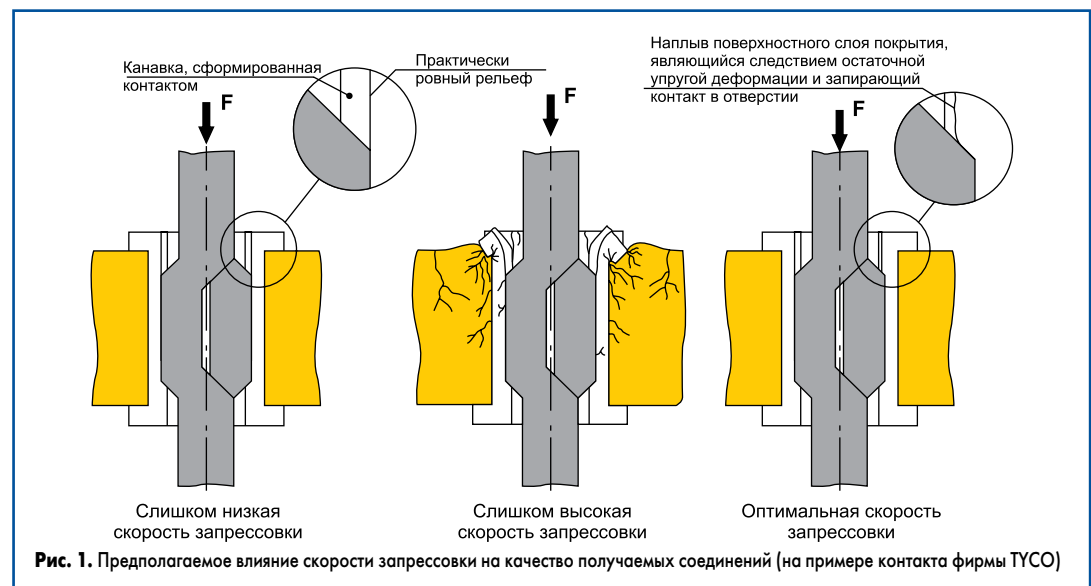
- Степень травматичности запрессовки для сквозного металлизированного отверстия.
- Усилие удержания контакта в отверстии.
- Применение запрессовываемых контактов.
- Бессвинцовые покрытия.

Этот перечень не является исчерпывающим по рассматриваемой тематике, однако перечисленные направления наиболее важны и интересны для изучения.

Характер внедрения контактов в сквозное металлизированное отверстие

Одним из факторов, определяющих характер внедрения контактов в сквозное металлизированное отверстие, является скорость запрессовки (рис. 1).

При слишком высокой скорости подачи штока прессы вывод соединителя будет резко входить в сквозное металлизированное отверстие, из-за чего оно и окружающие его участки печатной платы не смогут успеть среагировать на изменение диаметра



тра своей пластической деформацией. В итоге это может привести к возникновению трещин в отверстиях и в самой плате. С другой стороны, слишком медленная подача штока не обеспечит достаточной прочности удержания вывода в отверстии, так как металлическое покрытие успеет среагировать на изменение диаметра и не даст той остаточной упругой деформации, которая обеспечит «запирание» запрессовываемой части контакта в отверстии. Однако все эти выводы пока являются лишь теоретическими и требуют экспериментального подтверждения, что в случае их верности обуславливает необходимость разработки методик определения и практической оценки оптимальной скорости запрессовки.

Стандарт IEC 60352-5 рекомендует выбирать скорость подачи усилия запрессовки (на штоке прессы) в диапазоне 25–50 мм/мин. Конкретную величину скорости запрессовки приходится определять эмпирически, исходя из конкретных условий запрессовки. К сожалению, до сих пор не проводились исследования, результаты которых позволили бы установить какие-либо закономерности между скоростью и условиями запрессовки и разработать соответствующие практические рекомендации.

Другим фактором, определяющим характер внедрения контактов в сквозное металлизированное отверстие, является начальная ориентация контакта в процессе запрессовки. Технологический процесс запрессовки предусматривает наживление (предварительную установку) контакта (соединителя) в отверстие. Эта операция осуществляется вручную. От аккуратности выполнения этой операции зависит качество запрессовки.

Соединитель следует устанавливать на плату до его упора утолщенными частями выводов и обеспечения его фиксации на плате. Так как в данном случае соединитель устанавливается вручную, необходимо не только прилагать плавное и равномерное усилие одновременно к обеим боковым стенкам соединителя, но и по возможности соблюдать строгую вертикальность его ориентации. При этом нужно следить за тем, чтобы утолщенными частями выводов соединитель не слишком глубоко (а только до момента фиксации) вошел в отверстие платы. В противном случае при перекосе и слишком глубоком наживлении ручная предварительная установка изначально задаст неправильную ориентацию соединителя. Слишком плотная посадка не даст соединителю самостоятельно выправить положение, что в конечном итоге может привести или к искажению надлежащего положения выводов соединителя в отверстии (что чревато нарушением целостности проходящих через соединитель сигналов), или к разрушению корпуса соединителя и структуры металлизированного отверстия.

Характер вскрытия поверхностного слоя

Поверхностный слой (как на контактах, так и на внутренней металлизации отверстия) представляет собой совокупность оксидов и жировых образований. Эти вещества при-

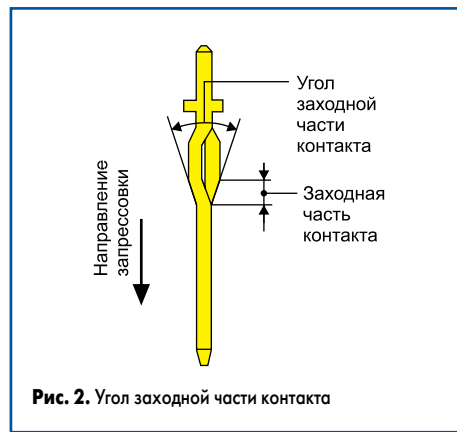


Рис. 2. Угол заходной части контакта

водят к возникновению коррозии, толщина которой может составлять от 5 до 100 нм. Таким образом, для получения надежного электрического соединения между контактом и отверстием необходимо вскрыть поверхностный слой до базового материала. В процессе запрессовки этот процесс выполняется механически, самим контактом, на начальном этапе выполнения операции. В частности, прорыв поверхностного слоя осуществляет заходная часть контакта (рис. 2).

Вскрытие поверхностного слоя зависит от формы заходной части контакта. Чем меньше угол этой части контакта, тем плавней и менее травматично для отверстия происходит вскрытие поверхностного слоя. Этот фрагмент конструкции ориентирует контакт надлежащим образом при его входе в отверстие и обеспечивает плавный характер деформации как запрессовываемой части самого контакта, так и боковых стенок металлизированного отверстия.

Угол заходной части является также одним из факторов, определяющих усилие запрессовки. Соответственно, чем меньше угол заходной части контакта, тем меньше начальное усилие запрессовки и механическое воздействие на контакт (или корпус соединителя) со стороны пуансона прессы.

Однако необходимо иметь в виду, что слишком маленький угол заходной части контакта — это негативный фактор для процесса запрессовки. При малых значениях угла заходной части контакт может не прорезать, а лишь примять поверхностный слой, переместив его на запрессовываемую часть (рис. 3).

Заслуживает внимания тот факт, что характеристики данного фрагмента контакта, впрочем, как и других его фрагментов, никоим образом не регламентируются стандартом IEC 60352-5. В этом стандарте есть лишь упоминание о том, что контакт должен иметь места приложения усилия запрессовки (буртики). Таким образом, конструкция контакта полностью остается прерогативой компании — разработчика соединителей.

Особую роль в процессе вскрытия поверхностного слоя играет микротвердость. Исторически сложилось так, что в технологии запрессовки она измеряется в единицах Кнупа (НК), которые по своей величине близки к единицам Виккерса (HV). Индентор Кнупа имеет продольный угол $172^{\circ}30'$ и поперечный угол $130^{\circ}0'$. Глубина отпечатка составляет примерно $1/30$ от его длины. Индентор Виккерса — это пирамида с квадратным основанием и с углом 136° между противоположными гранями. При использовании индентора Виккерса глубина получаемого отпечатка составляет примерно $1/7$ от длины диагонали. При одной и той же величине нагрузки индентор Виккерса проникает в два раза глубже индентора Кнупа, а диагональ отпечатка по Виккерсу составляет $1/3$ от длины отпечатка по Кнупу.

Таким образом, испытания на микротвердость с использованием индентора Виккерса меньше зависят от характеристики поверхности, чем испытания на твердость по Кнупу, и при равной величине нагрузки отпечаток от индентора Виккерса, из-за своей меньшей длины, более чувствителен к ошибкам при измерении отпечатка. Большая часть испытаний на микротвердость в США выполняется под на-

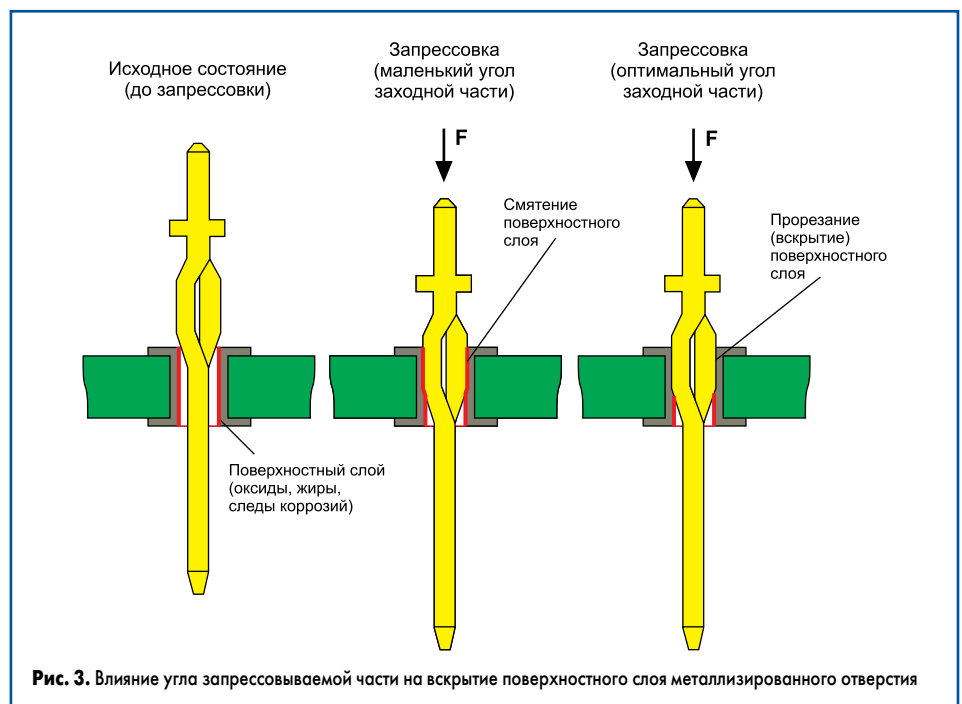


Рис. 3. Влияние угла запрессовываемой части на вскрытие поверхностного слоя металлизированного отверстия

грузкой 100 г и с помощью индентора Кнупа. В Европе в основном используются сравнительно более высокие нагрузки (500 г) и индентор Виккерса.

Учитывая все вышесказанное, для технологии запрессовки более целесообразным использовать методику измерения микротвердости по Кнупу. Запрессовываемые контакты обычно имеют 310 единиц по Кнупу, а медное покрытие в сквозных металлизированных отверстиях — 150 единиц по Кнупу.

Степень герметичности места электрического контакта

Герметичность электрического контакта — одно из главных преимуществ технологии запрессовки. Это качество также является одним из факторов, определяющих надежность электрического соединения между контактом и отверстием.

Герметичность зависит от глубины проникновения и усилия вдавливания упругих элементов контакта в слой металлизации отверстия и определяется площадью зоны соприкосновения упругих элементов контакта с боковыми стенками отверстия.

Вследствие неровностей рельефа область соприкосновения упругих элементов контакта с боковыми стенками отверстия не является сплошной поверхностью, а представляет собой совокупность участков соприкосновения разной площади и количества. Соответственно, чем выше усилие и глубина внедрения контакта в металлизацию отверстия, тем больше количество и площадь этих участков. Чем больше суммарное количество и площадь участков соприкосновения, тем выше общая герметичность электрического контакта.

Применяемые в настоящее время контакты имеют различную конструкцию запрессовываемой части и, следовательно, отличаются различной суммарной эффективной площадью электрического контакта. Этот факт позволяет говорить о различной степени герметичности соединений, получаемых с использованием контактов различных фирм.

Ориентировочно, варианты конструкций запрессовываемой части контактов по степени герметичности получаемого соединения можно расставить согласно рейтингу, представленному на рис. 4.

Уточнение данного рейтинга — это еще одно направление исследований в технологии запрессовки.

Степень травматичности для сквозного металлизированного отверстия

В данном случае под травматичностью подразумевается деформация сквозного металлизированного отверстия при запрессовке контакта. На рис. 5 представлены требования стандарта IEC 60352-5 к деформационным параметрам соединений, выполняемых запрессовкой.

Выполнение этих требований осложняется тем, что максимальная деформация и повреждения приходится именно на ту глубину печатной платы, на которой, согласно стандарту IEC 60352-5, должны изготавливаться контрольные микрошлифы (рис. 6).

Степень деформации зависит от давления на боковые стенки отверстия и площади соприкосновения контакта с ними.

Избыточная деформация отверстия вследствие воздействия контакта может привести к отрыву внутренних проводников печатной платы, подходящих к отверстию или к прорыву металлизации отверстия.

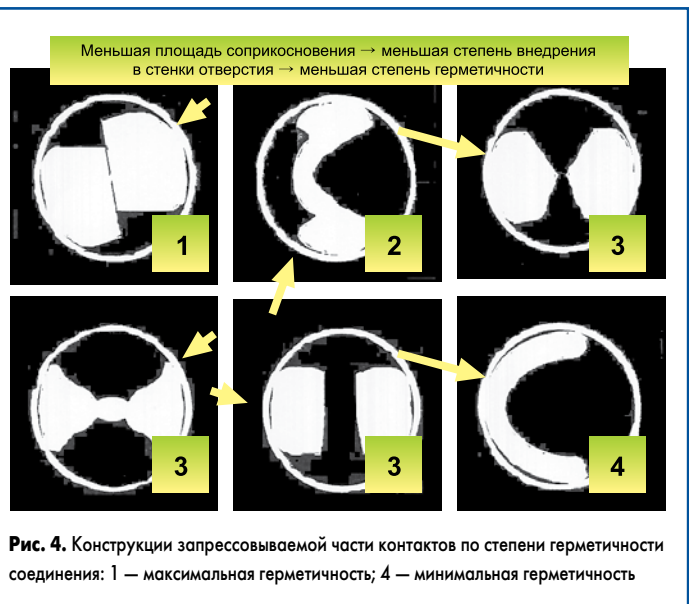


Рис. 4. Конструкции запрессовываемой части контактов по степени герметичности соединения: 1 — максимальная герметичность; 4 — минимальная герметичность

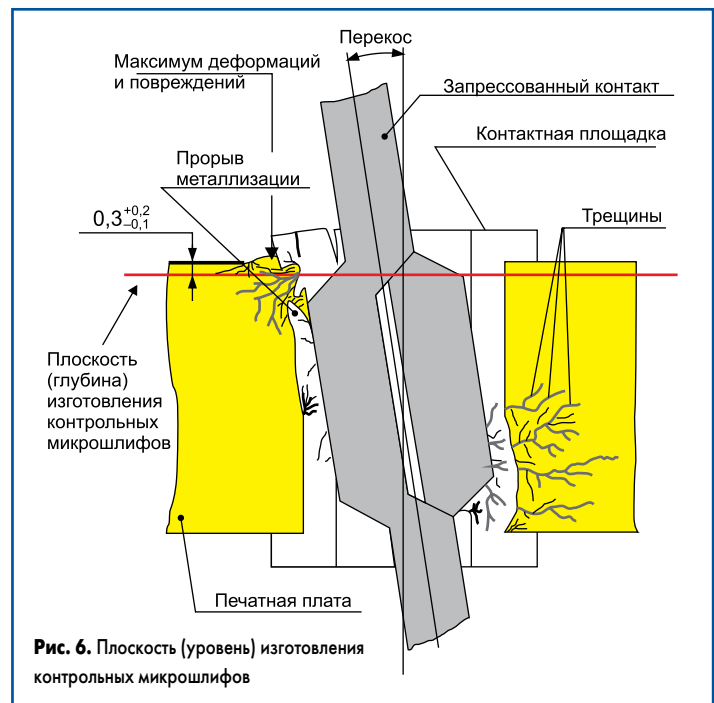
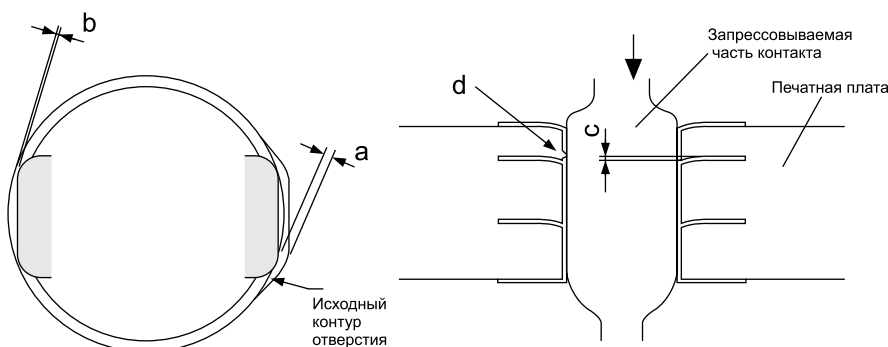


Рис. 6. Плоскость (уровень) изготовления контрольных микрошлифов

Усилие удержания контакта в отверстии

Усилие удержания контакта в отверстии является одним из факторов, определяющих качество и надежность соединений, получаемых запрессовкой. Это усилие обеспечивает неподвижность контакта в отверстии и, соответственно, стабильность электрического соединения между самим контактом и отверстием.



- a — деформация контура (стенок) отверстия, которое было получено после сверления, менее 70 мкм;
- b — остаточная толщина металлизации, более 8 мкм;
- c — деформация проводника, подходящего к сквозному металлизированному отверстию, не более 50 мкм;
- d — трещина: не допускается ни в сквозном металлизированном отверстии, ни в подходящих к нему проводниках

Рис. 5. Требования стандарта IEC 60352-5 к деформационным параметрам соединений, выполняемых запрессовкой

В период появления технологии запрессовки (конец 1960-х — начало 1970-х годов) существовала потребность в достижении высоких значений усилия удержания (45 Н) (рис. 7). Это было вызвано тем, что на запрессованные контакты выполнялся монтаж накруткой, которые в те годы пользовались широкой популярностью. В настоящее время считается, что при минимальных требованиях к механическим нагрузкам для удержания контакта в отверстии достаточно усилия в 3 Н.

Усилие удержания контакта определяется силами трения между соприкасающимися поверхностями контакта и отверстия.

Характеристики трения — это не фундаментальный параметр материала, как, например, кристаллическая структура, модуль Юнга или твердость. Трение — это процесс механического (упруго/пластично), химического (адгезия) и термического взаимодействия друг с другом двух соприкасающихся материалов со своей морфологией и микроструктурным профилем.

Способность соприкасающихся поверхностей рассеивать энергию трения в процессе тангенциального скольжения определяет картину процесса трения. Увеличение нормальной нагрузки приводит к пластической деформации больших объемов материала и увеличению площади взаимодействующих поверхностей.

Трение количественно оценивается коэффициентом μ , представляющим собой соотношение усилия, необходимого для сдвига двух соприкасающихся поверхностей. В целом динамику изменения коэффициента трения можно представить в виде графиков зависимости, представленных на рис. 8:

- Диапазон нагрузки А ($F_N < 10$ Н) — трение по закону Амонтона-Кулона. В диапазоне нагрузки А коэффициент трения μ не зависит от геометрии двух контактирующих поверхностей.
- Диапазон нагрузки В ($10 \text{ Н} < F_N < 22$ Н) — переходное трение. Усилие F_N возрастает, поток пластической энергии покрытий приводит к образованию зон деформации, и глубина бороздок износа достигает толщины покрытий. Закон Амонтона-Кулона прекращает действовать.
- Диапазон нагрузки С ($F_N > 22$ Н) — тонкий мягкий металлический слой на более твердой поверхности. Переход границы в состояние, которое подчиняется классическому закону Амонтона-Кулона, завершается.

Вертикальные линии на рис. 8, разделяющие диапазоны А, В и С, — условны, их расположение зависит от взаимодействия между покрытиями и геометрии двух соприкасающихся поверхностей.

Применение запрессовываемых контактов

В настоящее время наиболее популярными разновидностями являются контакты с запрессовываемой частью в форме игольного ушка и в виде смещенных относительно друг друга упругих элементов, а также с многоспиральной запрессовываемой частью (рис. 9, таблица).

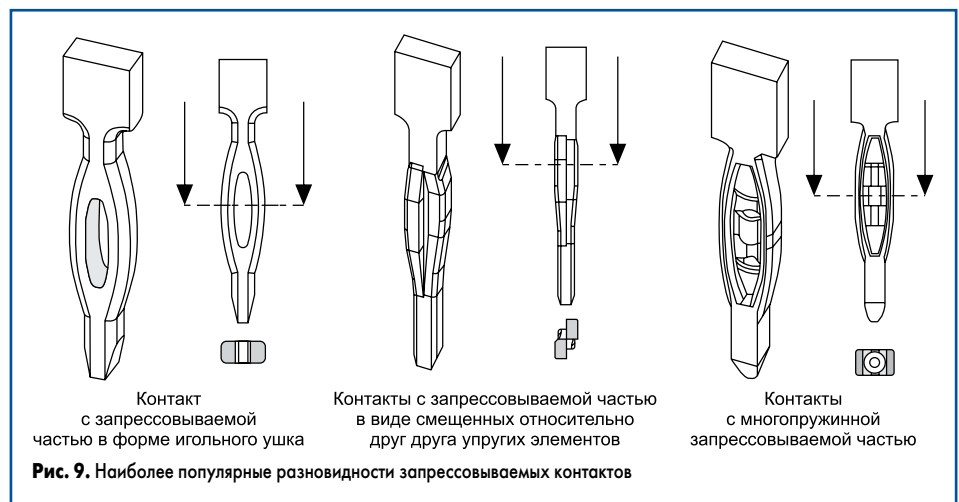
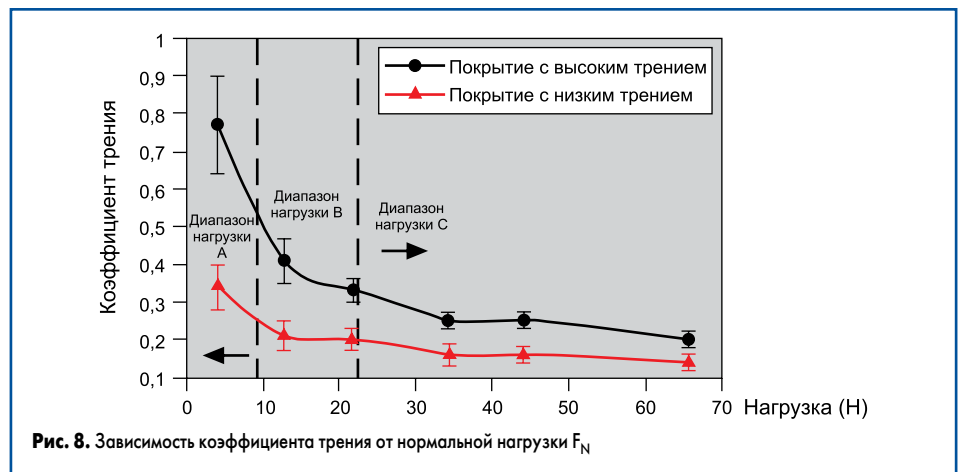
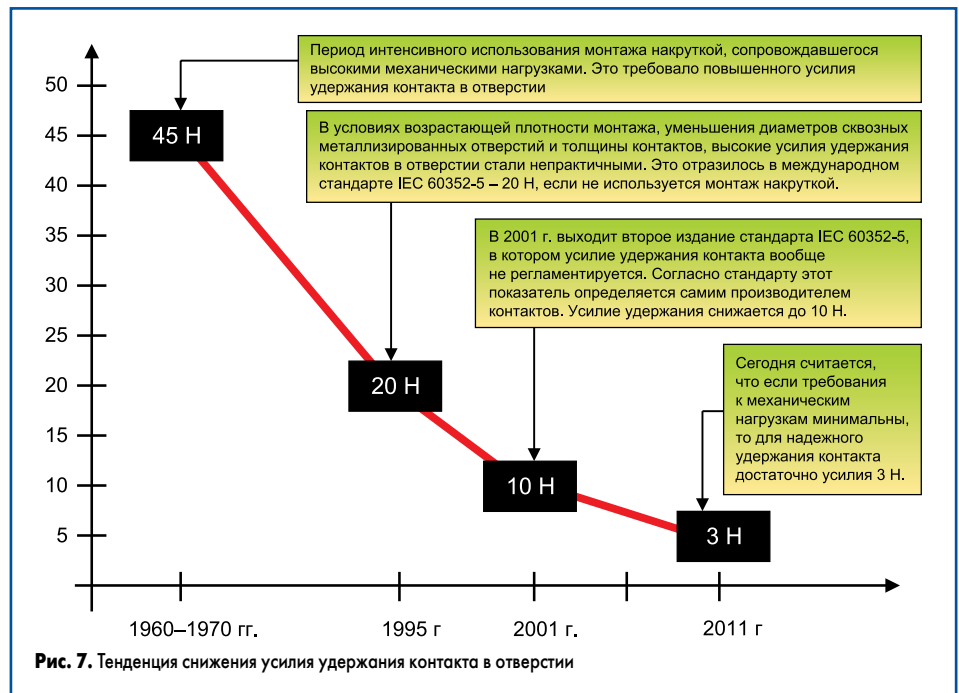


Таблица. Применение запрессовываемых контактов

Разновидность контактов	Краткая характеристика
Контакты с запрессовываемой частью в форме игольного ушка	Очень популярная конструкция, используемая большинством производителей. Эти контакты обычно применяются для монтажа в более тонкие печатные платы
Контакты с запрессовываемой частью в виде смещенных относительно друг друга упругих элементов	Эта конструкция предусматривает запрессовку в более толстые печатные платы и, как правило, применяется в вилочных контактах. Хотя существуют соединители SotradPCI с этими контактами в виде розеток и вилок
Контакты с многоспиральной запрессовываемой частью	Такая конструкция отличается более высокой механической стабильностью запрессовываемой части. Предусматривает запрессовку в более толстые печатные платы

Бессвинцовые покрытия

Непаяные соединения, выполняемые запрессовкой, обеспечивают идеальное соответствие требованиям охраны окружающей среды и при этом не подпадают под действие директив RoHS (Restriction of Hazardous Substances — Директива об ограничении использования определенных опасных веществ) и WEEE (Waste Electrical and Electronic Equipment — Директива об отходах от электрического и электронного оборудования).

Однако проблема заключается в том, что сегодня большая часть производителей, согласно указанным выше директивам, переходят на использование бессвинцовых припоев и покрытий. Конечно, эта тенденция не касается продукции военного назначения, но дело в том, что электронные компоненты и изделия класса Military (то есть военного назначения), которые заведомо ориентированы на свинцовые технологии, не всегда доступны как с точки зрения возможности их получения, так и с точки зрения их цены. Это обстоятельство вынуждает переходить на использование альтернатив класса Industrial (промышленного назначения). А это, в свою очередь, приводит к возможности появления в технологическом процессе бессвинцовых припоев и покрытий.

Таким образом, существует вероятность попадания соединений, выполняемых запрессовкой, в бессвинцовую среду. В этих условиях параметры технологического процесса запрессовки, скорее всего, будут отличаться от аналогичных характеристик операций, выполняемых с использованием покрытий, содержащих свинец.

С целью проверки данного предположения в 2003 году специалисты компании Tuso Electronics провели крупномасштабное исследование, которое охватывало сразу несколько вариантов запрессовываемых контактов и типов бессвинцовых покрытий. Все тестовые сочетания контактов, покрытых чистым оловом, и бессвинцовых покрытий печатных плат показали успешные результаты по визуальному контролю и микрошлифам, операциям ремонта, электрическим характеристикам и надежности. Был сделан вывод о том, что

чистое олово — это хорошая альтернатива покрытию олово-серебро для запрессовываемых контактов соединителей.

Более высокое усилие запрессовки, в основном вызванное иммерсионными слоями на платах в сочетании с чистым оловом на контакте, может вызвать проблемы, если оно прилагается напрямую к плечикам контактов. Эта ситуация типична для запрессовки, например, прямых вилочных соединителей. Розетки или прямоугольные вилки запрессовываются нажатием на пластиковый корпус соединителя. При этом более высокое усилие запрессовки может вызвать трещины в корпусе и «выпирающие» контакты. Хотя в большей степени вероятность возникновения трещин зависит от скорости запрессовки, приспособления и особенностей прессы.

С другой стороны, гальваническое золото, которое предпочитают использовать некоторые производители печатных плат, приводит к снижению усилия удержания контактов. Однако согласно многочисленным исследованиям это обстоятельство никоим образом не влияет на надежность соединений, выполняемых запрессовкой.

В целом, согласно проведенному исследованию, применение бессвинцовых покрытий в процессе запрессовки сопровождается увеличением усилий запрессовки и удержания контактов. Поэтому при использовании бессвинцовых технологий необходимо уделять особое внимание запрессовке соединителей плоскими пуансонами (следить за тем, чтобы контакты не проникли в корпус соединителя) и иметь в виду возможность повреждения/деформации сквозного металлизированного отверстия.

Заключение

Несмотря на кажущуюся простоту, запрессовка контактов в сквозные металлизированные отверстия печатных плат — это сложный, многофакторный и ответственный процесс, требующий к себе особого внимания.

К основным факторам процесса запрессовки относятся: степень травматичности для сквозного металлизированного отверстия, характер вскрытия поверхностного слоя, характер вне-

дрения контактов в сквозное металлизированное отверстие, бессвинцовые покрытия, степень герметичности места электрического контакта, применение запрессовываемых контактов, усилие удержания контакта в отверстии.

Несмотря на то, что в целом все контакты соответствуют стандарту IEC 60352-5, между ними существуют различия как в материалах, так и в конструкции. Это вызвано либеральностью указанного стандарта, в котором выполнение большей части требований отдано на усмотрение компаний — изготовителей контактов.

Таким образом, контакты могут по-разному вести себя в различных условиях применения. Этот факт приводит к выводу о необходимости анализа поведения контактов в различных условиях окружающей среды, что особенно актуально для изделий военного назначения.

Литература

1. Плотников Ф. Г. Непаяные соединения, выполненные запрессовкой, — новый класс соединений на российском рынке электронной техники // Компоненты и технологии. 2001. № 1.
2. Медведев А. М. Соединения типа Press Fit // Компоненты и технологии. 2006. № 8.
3. Плотников Ф. Г., Чуев А. П. Конструктивно-технологический анализ непаяных соединений, выполняемых запрессовкой // Успехи современной радиоэлектроники. 2012. № 1.
4. Stolze T., Thoben M., Koch M., Severin R. Reliability of PressFIT Connections // Infineon Technologies AG, www.bodospower.com. June 2008.
5. IEC 60352-5, Solderless Connections — Part 5: Press-in connections — General requirements, test methods and practical guidance. Edition 3.0. Jan. 2008.
6. Corman N., Myers M., Copper C. Friction Behavior of Press-Fit Applications: Test Apparatus and Methodology // Proceedings of the 49th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts. Sept. 2003.
7. Chou G. J. S., Hilty R. D. Toward Lead-Free Compliant Pin Connections // Proceedings of the 2005 SMTA International Conference. Chicago, IL, USA. Sept. 25–29, 2005.