

ЗАМЕЧАТЕЛЬНЫЕ СВОЙСТВА НЕПАЯНЫХ НЕРАЗЪЕМНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Все, кто знаком с автомобильной электроникой, с прокладкой сетей, с вычислительной техникой и средствами коммуникаций, хорошо знают и используют в своей практике методы непаяных соединений. Но в последнее время на страницах технических журналов в основном пишут о проблемах и решениях паяных соединений. В этой статье хочу напомнить всем конструкторам и технологам РЭА о замечательных свойствах непаяных неразъемных соединений.

К группе непаяных соединений относят все неразъемные соединения, образующиеся за счет холодной деформации стыков соединяемых элементов. Усилия вдавливания этих элементов друг в друга с образованием герметичной зоны металлического контакта – обязательное условие образования прочного и надежного соединения. Наиболее распространенные непаяные соединения – это соединения скручиванием и намоткой, под зажим, соединения обжатием и соединением прессованием контактных штырей в металлизированные отверстия (Press-Fit).

ПРИНЦИПЫ НЕПАЯНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

В силовой электронике, в электротехнических сетях непаяные соединения широко распространены: практически все сильноточные соединения выполняются или скрутками, или зажимом под винт. Алюминиевые провода, имеющие прочную окисную пленку, скручивают только в высоковольтных сильноточных линиях, т.к. в этих условиях окисная пленка пробивается, а зона контакта оплавляется с образованием сварного соединения.

Для слаботочной аппаратуры, где малые токи и напряжения не способны улучшить "плохой" контакт, электрические соединения изначально не должны иметь разделительных

слоев из окислов и загрязнений. Это достигается холодной пластической деформацией стыков соединений, так что при этой деформации пленки окислов раздвигаются, обнажая чистый металл. Такое состояние сжатия должно удерживаться, чтобы обеспечить герметичность (газонепроницаемость) стыков для предотвращения окисления и нарушения металлической проводимости.

В этой статье рассмотрим конструкции и технологии непаяных соединений с позиций обеспечения пластической деформации и удержания герметичности контактной зоны*. Обусловленность применения непаяных соединений определяется конкретной конструкцией контактов, но общие преимущества всех непаяных соединений состоят в следующем:

- отсутствие необходимости в нагреве для образования соединения, что в ряде случаев является решающим преимуществом,
- коррозионная стойкость за счет герметичности контакта,
- экономичность,
- простота ремонта (нагрев не нужен),
- гигиеничность в производстве (нет флюсов и припоев),
- высокая надежность.

*Медведев А.М. Сборка и монтаж электронных устройств. – М.: Техносфера, 2007.

Наиболее характерными свойствами для непаяных соединений с точки зрения разрешения проблем надежности обладают соединения методом накрутки, поэтому с них и начнем наше знакомство.

КОНТАКТНОЕ СОЕДИНЕНИЕ НАКРУТКОЙ

Монтаж накруткой предназначен для получения электрических соединений с помощью одножильных проводов и штыревых выводов. Он широко применяется для электрического монтажа блоков, панелей и рам. Помимо вышеперечисленных преимуществ непаяных соединений монтаж накруткой ускоряет процесс электрического монтажа аппаратуры и повышает надежность соединений по сравнению с паяными при механических и климатических воздействиях.

Контактное соединение накруткой – это соединение изолированного провода (участка провода) с выводом, имеющим острые кромки, при котором провод навивается на вывод с определенным усилием (рис.1). Электрический контакт возникает в зонах контакта провода с острыми кромками вывода (рис.2). Натяжение провода при накрутке позволяет разрушить пленку оксидов на контактирующих металлах, способствует вдавливанию провода в острые кромки вывода и образованию газонепроницаемого металлического контакта (рис.3). Соединение накруткой возможно и в случае применения провода с тонкой изоляцией – изоляция прорезается острыми кромками вывода. Концентрация напряжений в зонах контакта и среднее давление порядка 700 МПа обуславливают взаимную диффузию металлов.

Соединение накруткой должно удовлетворять следующим требованиям:

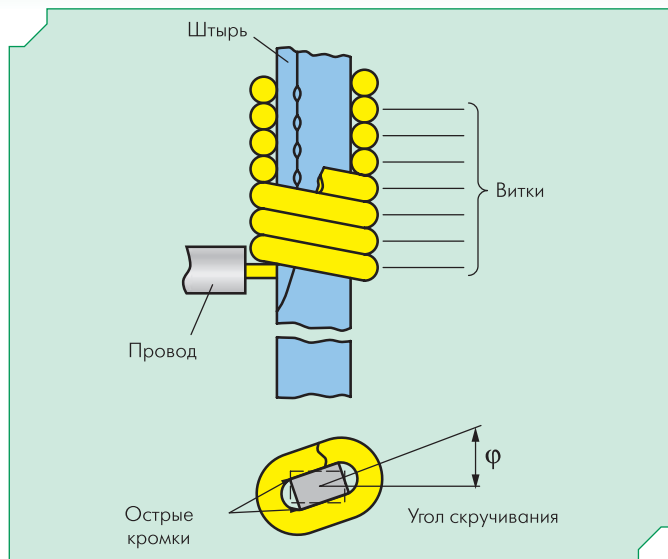


Рис.2 Деформации в накрутке

- минимальные номинальное и переходное сопротивления,
- газонепроницаемость для исключения коррозии,
- сумма площадей зон контакта должна быть больше поперечного сечения провода,
- электрическая стабильность во времени при механических и климатических воздействиях.

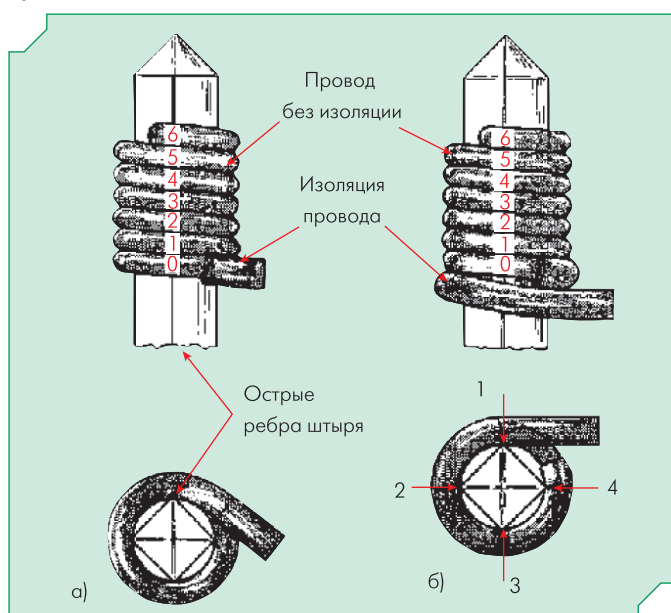


Рис.1 Соединение накруткой провода на хвостик разъема: регулярная накрутка (а) и модифицированная накрутка (б)

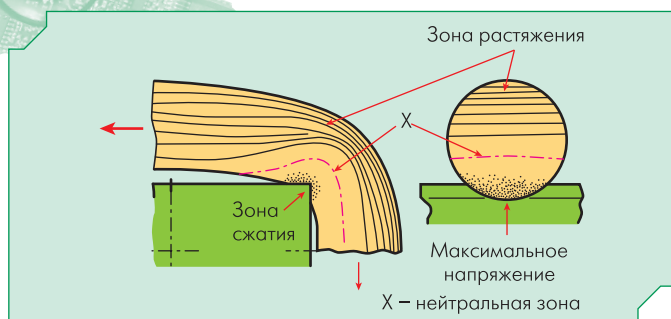


Рис.3 Напряжения и деформации в зоне сжатия провода в накрутке

Эти требования обеспечиваются выбором соответствующих материалов вывода и провода, конструкцией соединения и технологическими условиями его получения.

Материал вывода должен обладать достаточной пластичностью для образования поверхностей контакта в результате деформирования острых кромок. Необходима определенная упругость и прочность вывода для сопротивления скручиванию его в процессе навивки провода. От состояния поверхностного слоя материала зависят электрические параметры соединения. Для изготовления выводов применяют медь, латунь, плакированную сталь, никелево-серебряные сплавы, бериллиевую и фосфористую бронзы. Последние имеют наилучшие физико-механические свойства, такие как высокий модуль упругости, низкое остаточное напряжение, коэффициент линейного расширения, близкий к коэффициенту линейного расширения медного провода.

На выводы наносят покрытия из серебра, золота, олова или сплава олово-свинец, предохраняющие поверхности от окисления, способствующие процессу диффузии металлов и определяющие значения переходного сопротивления.

Выводы из латуни и бронзы, предназначенные для специальной электронной аппаратуры, гальванически покрывают золотом (3–6 мкм) с предварительным серебрением (9–12 мкм), либо серебром (6–9 мкм) с предварительным никелированием (1–3 мкм). В обычной аппаратуре используют выводы из меди с покрытием оловом или сплавом олово-свинец толщиной не более 35–40 мкм.

В качестве провода для накрутки используют медный одножильный провод, имеющий относительное удлинение не менее 20%. Рабочий участок провода освобождают от изоляции и лудят. Кроме меди используют латунь, никелевое железо или никелевую проволоку.

Для прочности элементов соединений необходимо обеспечить равенство суммы площадей контакта провода со штырем и площади поперечного сечения провода. Это условие обеспечивается 16–20 точками контакта в зависимости от диаметра провода. Поэтому соединение делают многовитковым.

Следует указать, что соединение, состоящее из 5–6 витков луженого медного провода, навитого на вывод из фосфористой бронзы с золотым или серебряным покрытием, имеет номинальное сопротивление 0,001–0,003 Ом. После электри-

ческих, механических и климатических испытаний оно увеличивается не более чем на 0,001 Ом. Переходное сопротивление контакта в накрутке составляет 0,0004–0,0008 Ом и после испытаний изменяется по закону, близкому к закону нормального распределения.

Большое значение в обеспечении электрической и механической стабильности соединения имеет процесс диффузии контактирующих металлов. Напряжение в навитом проводе снижается в процессе эксплуатации на 20–50% в зависимости от температурного воздействия. Диффузия металлов покрытия увеличивает механическую прочность и обеспечивает сохранение электрических параметров соединения во времени. Срок службы соединения накруткой при нормальных климатических воздействиях 15–20 лет.

КОНСТРУКЦИИ СОЕДИНЕНИЙ НАКРУТКОЙ

Для накрутки применяют одножильный провод диаметром 0,17–1,2 мм. Провод большего диаметра требует увеличения усилия натяжения и использования более прочных выводов.

Вывод должен иметь минимум две острые кромки. В соответствии с этим условием применяют выводы с квадратной, прямоугольной, ромбовидной, двойной треугольной, U- и V-образной формой поперечного сечения. Наибольшее распространение получили квадратные и прямоугольные выводы, причем квадратные имеют ряд преимуществ при автоматизации монтажа накруткой.

U- и V-образные выводы обладают большей упругостью по сравнению с прямоугольными при одинаковой площади поперечного сечения. Их применяют в ламповых панелях и реле, а также для монтажа аппаратуры, работающей при температуре 120–180°C. При такой температуре напряжение в проводе в течение 3 ч снижается вдвое, а упругость вывода позволяет сохранить электрические и механические параметры соединения.

Для обеспечения сопротивления скручиванию при навивке площадь поперечного сечения вывода должна быть не меньше площади сечения провода. Обычно отношение диаметра жилы провода к стороне квадратного вывода составляет 0,5–0,6, а к стороне прямоугольного вывода – 0,3–0,5. Отношение сторон штыря прямоугольного сечения должно быть не более 1:3. Радиусы острых кромок выводов по покрытию – 0,05–0,08 мм, параллельность сторон – 0,05–0,06 мм на длине 10 мм, отклонение от плоскостности – не более 0,25 мм.

Длина вывода составляет 12–38 мм и определяется тремя факторами: диаметром провода, числом витков в соединении и количеством соединений на выводе.

Чтобы обеспечить оптимальное число контактных поверхностей с площадью газонепроницаемых участков, превышающей площадь поперечного сечения провода, соединение накруткой должно иметь от четырех до восьми витков для проводов диаметром 0,2–1,2 мм. При расчете числа витков

следует учитывать, что вывод квадратной, прямоугольной и ромбовидной форм сечения имеет четыре точки контакта на виток, V-образной и треугольной – три, U-образной – 2,5. Две первые и две последние точки контакта не дают надежного соединения. Поэтому число эффективных зон контакта с выводом определяют как сумму всех точек соприкосновения извитого провода за вычетом четырех.

Соединение накруткой должно быть самозапирающимся, чтобы провод не мог сойти со штыря. Симметричные поперечные сечения или имеющие в поперечном сечении эллипс не подходят с этой точки зрения. Из-за наличия сторон, симметричных по отношению к центральной оси штыря с квадратным сечением, самоблокировка провода, навитого на такой штырь, не столь велика, как у штырей с прямоугольно-продолговатым сечением. С этой точки зрения идеальная форма сечения – параллелепипед, асимметрично расположенные края которого предохраняют витки от ослабления. После прекращения воздействия накрутки у одного из углов провод изгибается и здесь уже не контактирует с ребром. Однако когда он попытается также отойти от другого угла, то потянет первый угол к центральной точке штыря, там останавливается, и, таким образом, провод после второго края уже не отделяется, т.е. провод вследствие асимметричности сечения штыря блокирует себя.

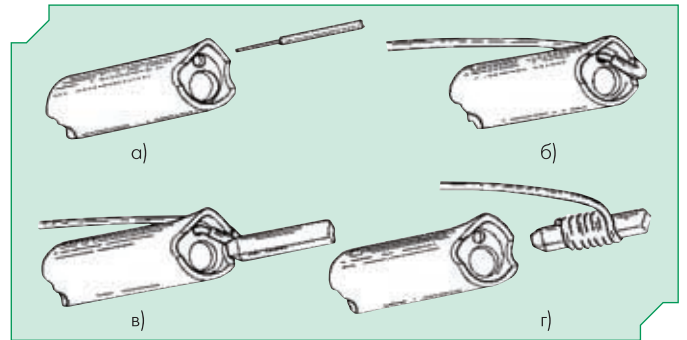


Рис.4 Последовательность операций накрутки: оправка и зачищенный провод (а), провод введен в захватывающее отверстие и зафиксирован в оправке (б), оправка с проводом надвигается на штырь, включается вращение оправки (в), накрутка выполнена (г)

При монтаже накруткой применяют три вида соединений: обычное, модифицированное и бандажное (см. рис.1). Первое из них получают путем навивки на вывод неизолированного участка одножильного провода. Модифицированное соединение отличается от обычного наличием 1-2 витков изолированного провода. Изоляция снижает вероятность поломки первого витка провода при механических воздействиях (вибрации, смещениях вывода) за счет уменьшения концентрации напряжения в точках контакта. Но габариты такого соединения увеличиваются. Поэтому, когда шаг выводов для накрутки становится меньше 2,5 мм, применение модифицированного

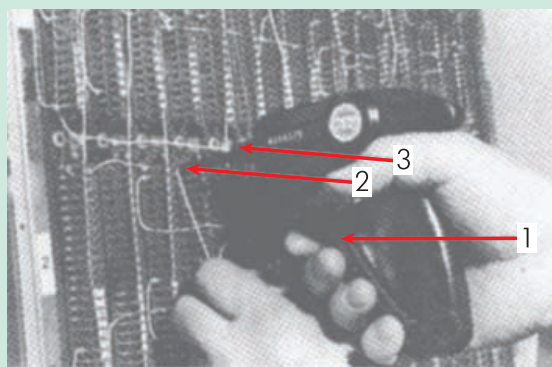


Рис.5 Инструмент для накрутки в руках оператора: курок инструмента (1), оправка (2) и шпindelь (3)

соединения затруднительно. Бандажное соединение состоит из нескольких витков бандажной проволоки. Провод при накручивании захватывает и обжимает штырь и вывод (провод, вывод, шина и др.). Вывод должен прилегать к широкой поверхности штыря.

Наибольшее применение нашло модифицированное соединение, особенно в аппаратуре, подвергающейся механическим воздействиям. При малом шаге между выводами и больших сечениях монтажного провода применяют обычное соединение. Бандажное соединение рекомендуется для образования контактных соединений с выводами навесных элементов, шинами питания и при использовании для монтажа многожильных проводов, не способных к накрутке.

ЗАКРЕПЛЕНИЕ И ПРОЧНОСТЬ СОЕДИНИТЕЛЬНЫХ ШТЫРЕЙ

Штыри следует встраивать и закреплять в панели прессованием, завинчиванием или пайкой, так чтобы они прочно, без повреждений сопротивлялись возникающему во время накрутки крутящему моменту, а в дальнейшем – различным механическим нагрузкам. Надежность соединений тем выше, чем больше прочность штырей на скручивание.

Во время накручивания провода давление, возникающее на контактирующих поверхностях, достигает величины 700 МПа. Вследствие пластической деформации это давление непосредственно после накрутки провода снижается приблизительно до 200 МПа и становится постоянным. Соединение может ослабиться и дальше за счет явлений релаксации (в данном случае – холодной текучести). Испытания на долговечность демонстрируют, что в соединениях накруткой давление не снижается ниже 50% от исходного состояния спустя годы. И такое давление контактирующих поверхностей достаточно для обеспечения необходимой постоянной величины высокой проводимости.

Если на штырь накручивается не один, а три накрутки, каждая из последующих накруток ослабляет предыдущую на 10–20%. Если соотношение размеров поперечного сечения штыря с диаметром и пластичностью провода выбраны неправильно, первая (нижняя) накрутка может оказаться на-

столько ослабленной, что может сойти со штыря. Но и при правильном выборе соотношений первая накрутка ослабляется из-за деформации штыря второй накруткой на 20%, третьей накруткой – на 30%. Но оставшиеся напряжения, удерживающие на штыре первую накрутку, достаточны для обеспечения прочности и надежности соединения.

ТЕХНОЛОГИЯ НАКРУТКИ

Накрутку провода на штырь производят в следующей последовательности (рис.4):

- выбирают оправку, соответствующую конфигурации штыря и размеру провода;
- нарезают провода заданных длин;
- укладывают провода разной длины в соответствующие ячейки кассы;
- очищают провода от изоляции на заданной длине;
- вставляют провода в отверстие оправки на глубину, определяемую длиной очищенного от изоляции провода (пока края изоляционной оболочки не натолкнутся на вход отверстия, куда вставляется провод);
- загибают провод вокруг втулки оправки, так чтобы он не закрывал отверстие, предназначенное для штыря. Свободный конец провода придерживают;
- по таблице соединений находят адрес штыря, с которого начинается цепь соединений;
- оправка с проводом насаживается на штырь, соответствующий началу цепи, и включается вращение оправки;
- находится второй адрес цепи, прокладывается провод между штырями по направлению ко второму адресу, и повторяются операции накрутки. Поскольку длина цепей разная, длина проводов также указывается в таблице соединений и выбирается из соответствующей ячейки кассы с проводами.

Время собственно накрутки составляет около 1 с, после чего оправку снимают со штыря. Продолжительность всей операции (введение провода, его изгиб, насаживание на штырь, включение вращения, остановка, снятие инструмента) около 2,5 с. Поэтому если провода для накрутки уже подготовлены и разложены по ячейкам кассы, производитель-

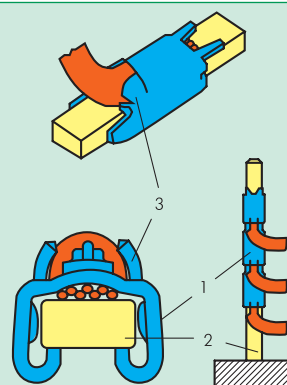


Рис.6 Соединение типа "термипойнт"

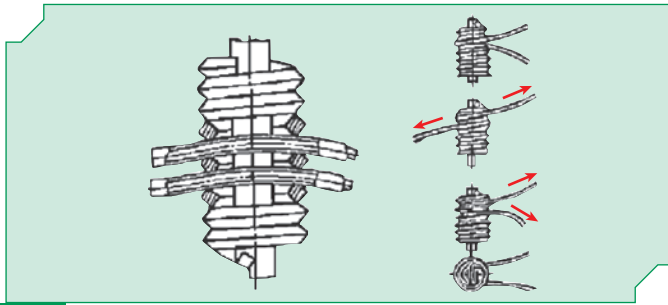


Рис.7 Схема соединения с помощью спиральной пружины

ность накрутки составляет 1000–1400 соединений в час. Ручная подготовка проводов даже при наличии соответствующих инструментов для снятия изоляции и нарезки на нужную длину менее производительна (в 3–4 раза). Подготовка проводов на автоматах совпадает по производительности с ручной накруткой (1500 проводов в час).

Считывание информации с таблиц отвлекает оператора и резко снижает производительность накрутки. Поэтому в серийном производстве адреса накруток и проводов в кассе диктуют оператору с магнитофона. При этом чтение адресов накладывают на музыку, чтобы скрасить оператору монотонность его труда.

При полуавтоматическом монтаже используется программа, которая помогает находить штыри с помощью сигнальных ламп, числовых индикаторов или координатным позициони-

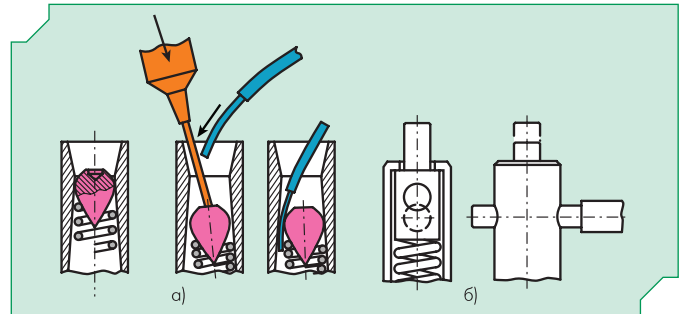


Рис.8 Клеммное соединение: штекерное соединение (а) и соединение пружиной сжатия (б)

рованием, т. е. подводом инструмента к нужному штырю. В соответствии с программой управления стол и каретка движутся таким образом, что дуло инструмента точно попадает в предназначенный для очередного соединения штырь. Монтажник только насаживает дуло инструмента на штырь и, приведя инструмент в действие, производит соединение. Движение каретки по очередному адресу также запрограммировано, чтобы провод прокладывался по назначенному пути. Очередной провод соответствующей длины высвечивается сигнальной лампой в кассе проводов (рис.5).

При автоматическом монтаже на автоматических линиях производится нарезка проводов, очистка от изоляции и накрутка штырей по заданной программе. В современном производстве необходимость в больших объемах соединений

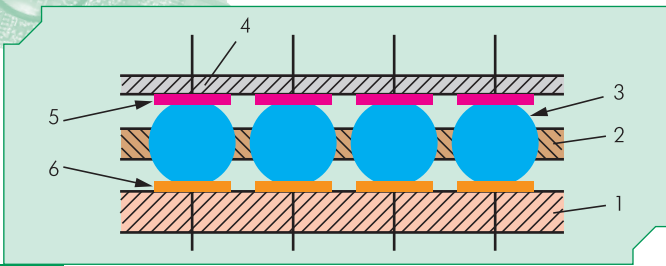


Рис.9 Соединения через токопроводящую резину ("зебра"): печатная плата(1), держатель токопроводящих элементов(2), токопроводящие резиновые элементы (3), компонент (4), контактное поле компонента (5), контактное поле платы (6)

накруткой исчезла, поэтому автоматические линии соединений накруткой постепенно выводятся из производства.

СОВРЕМЕННОЕ ПРИМЕНЕНИЕ НАКРУТКИ

Сегодня накрутка широко используется для реализации переменной части монтажа на унифицированных платах, когда нужно создавать модификации изделий за счет добавления связей к общей для всех модификаций массе соединений. Доля соединений, добавляемых накруткой, в этом случае не превышает 10%.

Соединения накруткой могут также успешно применяться и для изготовления паяных соединений, в которых олово наносится на накрученные провода. На одном штыре можно также разместить и паяное соединение многожильного провода, и накрученный одножильный провод. Пайка по понятным соображениям должна предшествовать накрутке.

Соединения накруткой хорошо сочетаются с технологией прессования штырей в отверстия. Тогда монтаж вообще обходится без процессов пайки или сварки. Крупные коммутационные блоки и стойки аппаратуры связи монтируются именно таким образом.

ЗАЖИМНОЕ СОЕДИНЕНИЕ СЖАТИЕМ ("ТЕРМИПОЙНТ")

Этот тип соединений был разработан фирмой Aircraft Marine Products (AMP) в начале 1960-х годов. Этим методом провода закрепляют в начале и конце соединения (Termination from point to point). Соединение образуется защемлением провода на штыре специальным зажимом – клипсой (рис.6). Пружинные захваты зажима прижимают провод к штырю с силой

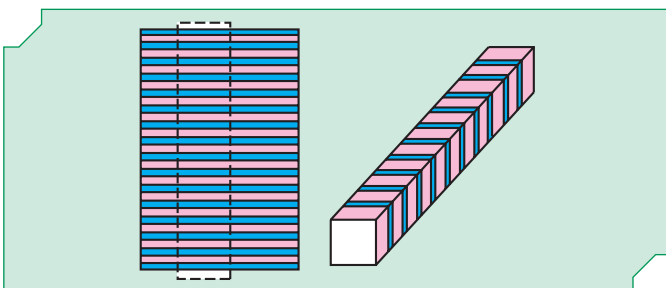


Рис.10 Эластичный разъем типа "зебра": многослойная спрессованная структура из чередования слоев токопроводящей и непроводящей резины (а), брусок, вырезанный из многослойного листа резины (б)

около 200 МПа. Поэтому соединение, имеющее относительно небольшую поверхность контакта, газонепроницаемо и механически устойчиво. Производительность метода в полуавтоматическом режиме 400–500 соединений в час.

Основной материал, используемый для подсоединения проводов, – твердая латунь, фосфористая бронза или луженая бронза; покрытие – никель, золото или олово-свинец. Поперечное сечение штырей – параллелограмм. Радиус округления боковых сторон штырей на механизме соединения не сказывается. Штыри рассчитывают на такую длину, чтобы на ней разместилось три соединения.

Материал провода для соединений "термипойнт" – медь, покрытая серебром, оловом или кадмием. Провод должен обладать достаточной прочностью, чтобы не разрушиться от давления прижима к штырю. Для соединений "термипойнт" преимущественно используют многожильные провода. Этот метод только для них и существует, так как для одножильных проводов используют метод накрутки. Концы провода необходимо освободить от изоляции на длине 3–4 мм.

Материал зажима (клипсы) – оловянистая или фосфористая бронза, обладающая хорошей упругостью. В качестве покрытия поверхности зажима используют серебро, олово, сплав олова с никелем. На рис.6 показана обычная форма зажима. Используют два размера зажимов: стандартный (длиной 4,5 мм) и миниатюрный (около 3 мм). Зажим можно использовать только один раз.

СОЕДИНЕНИЕ С ПОМОЩЬЮ СПИРАЛЬНОЙ ПРУЖИНЫ

Спиральная пружина пригодна для быстрого соединения проводов без снятия изоляции. Соединительный элемент представляет собой спиральную пружину квадратного сечения, изготовленную из фосфористой бронзы (рис.7).

Спираль пружины скручивают таким образом, чтобы ее витки поджимались друг к другу. Провода, предназначенные для соединения, продевают между витками. Острые грани витков прорезают изоляцию провода и сдирают окисную пленку, обеспечивая металлический контакт.

К одной и той же пружине могут быть присоединены провода различных диаметров. Витки пружины удерживают провода под постоянным сжатием. Каждый конец провода имеет контакт с пружиной в четырех точках, что обеспечивает надежность соединения.

КЛЕММНОЕ СОЕДИНЕНИЕ ПРИЖАТИЕМ

Провод задвигается в позолоченную соединительную трубку и прижимается там к внутренней стороне трубки овальной пробкой, поджимаемой пружиной. Для продвижения провода в трубку пробку отжимают с помощью инструмента, похожего на притупленное шило, а затем отпускают, чтобы она (пробка) зажала провод (рис.8а). Другое соединение с помощью пружины

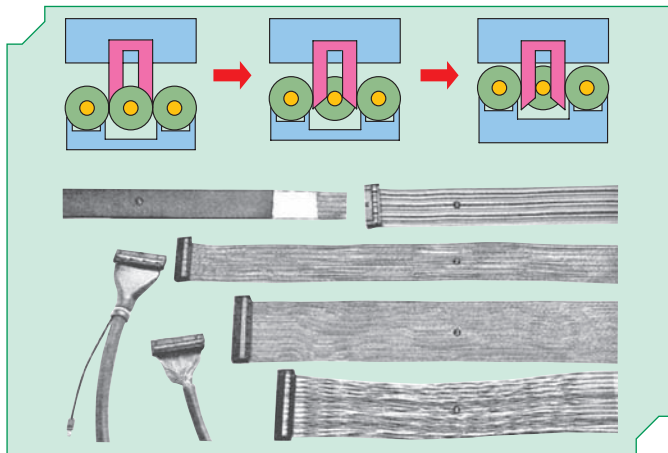


Рис. 11 Соединения врезанием разъемов на плоские кабели

жины сжатия уже давно используют для быстрого закрепления проводов в приборных клеммах (рис.8б). Зажим и извлечение провода производятся нажатием кнопки. Деформация провода относительно невелика.

Эти типы соединений относятся к разъемным соединениям.

ЭЛАСТИЧНОЕ СОЕДИНЕНИЕ ("ЗЕБРА")

Это разъемное соединение с нулевым усилием сочленения осуществляется через "островки" эластичного проводящего полимера (резины). Главный его недостаток – большое электрическое сопротивление (10–100 Ом). Но для ряда устройств

сопротивление соединений в этих пределах вполне допустимо: дисплеи (например, в электронных часах), сенсорные панели, контакты с электростатическими стоками и т.п. Известны эластичные контактные элементы, выполненные в виде шариков (рис.9) или вырезанные из многослойных пластин, чередующихся слоем саженалюминированной и непроводящей резины (рис.10). Эластичные контакты особенно хороши, когда нет гарантий ровности рельефа контактирующих поверхностей. Своей эластичностью они компенсируют эти неровности.

СОЕДИНЕНИЯ ВРЕЗАНИЕМ

Этот вид соединений можно видеть на плоских кабелях с большим числом проводов (рис.11), когда к ним нужно присоединить разъем. Ножи этого разъема при продвижении их на кабель прорезают изоляцию проводов плоского кабеля и фиксируются на жилах проводов. Естественно, что шаг ножей разъема должен совпадать с шагом проводов плоского кабеля.

Появление конструкций многослойных печатных плат с мощными цепями земли и питания, выполненных отдельными металлоемкими слоями, создало большие проблемы для технологов при монтаже. Проблемы эти позволяет решить метод соединения типа Press-Fit, с которым заинтересованный читатель может ознакомиться в указанной ранее книге. □