

Непаяные методы неразъемных соединений: накрутка

Непаяные методы соединений достаточно распространены, чтобы не обойти их вниманием. Все, кто знаком с автомобильной электроникой, с прокладкой сетей, с вычислительной техникой и средствами коммуникаций, хорошо знают и используют в своей практике методы обжима контактов, в экспериментальных лабораториях активно используют быстросменяемые условно неразъемные соединения для создания макетов.

**Аркадий Медведев,
профессор МАИ**

medvedevam@bk.ru

Рынок предлагает широкий инструментарий для реализации соединений, условно называемых непаянными.

Тема непаяных соединений настолько объемна, что охватить ее в одной статье не представляется возможным. Эта тема будет продолжена в последующих выпусках журнала.

В качестве анонса обозначим следующие темы: соединения скручиванием и намоткой, под зажим, соединения обжатием (самое распространенное), соединение контактных штырей с металлизированным отверстием (Press-Fit), соединения проводящими пастами, сопоставление методов межсоединений.

А данная статья посвящена соединениям накруткой, распространенным в методах макетирования и в многономенклатурном производстве электронных модулей.

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 контактирования — обязательное условие образования прочного и надежного соединения.

В силовой электронике и в электротехнических сетях непаяные соединения широко распространены: практически все силовоточные соединения выполняются или скрутками, или зажимом под винт. Алюминиевые провода, имеющие прочную окисную пленку, скручивают только в высоковольтных силовоточных линиях. В этих условиях в линии достаточно напряжения и мощности, чтобы окисная пленка пробилась, а зона контакта оплавилась 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 дефор-

мацией 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 дальнейшем мы будем рассматривать конструкции и технологии непаяных соединений с позиций обеспечения пластической деформации и удержания их с герметичностью контактной зоны.

Обусловленность применения непаяных соединений будет определяться конкретной конструкцией контактов. Но общие преимущества всех непаяных соединений состоят в следующем:

- отсутствие необходимости нагрева для образования соединения, что является в ряде случаев решающим преимуществом;
 - коррозионная стойкость за счет герметичности контакта;
 - экономичность;
 - простота ремонта — не нужен нагрев;
 - гигиеничность в производстве (нет ни флюсов, ни припоев);
 - высокая надежность.
- Сравнительные λ -характеристики некоторых типов соединений для равных условий эксплуатации, $ч^{-1}$:
- соединения накруткой — 10^{-13} ;
 - соединения обжатием — 10^{-11} ;
 - паяные соединения — 10^{-10} (ручная пайка);
 - соединения микросваркой — 10^{-9} .

Наиболее характерным для непаяных соединений с точки зрения разрешения проблем надежности являются соединения методом накрутки.

Монтаж соединений накруткой

Монтаж накруткой предназначен для получения электрических соединений с помощью одножильных проводов и штыревых выводов. Он был разра-

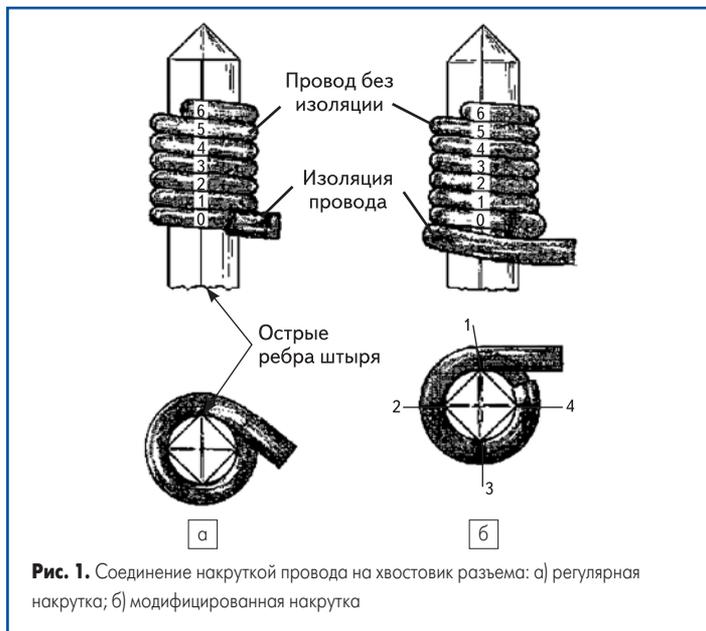


Рис. 1. Соединение накруткой провода на хвостовик разъема: а) регулярная накрутка; б) модифицированная накрутка

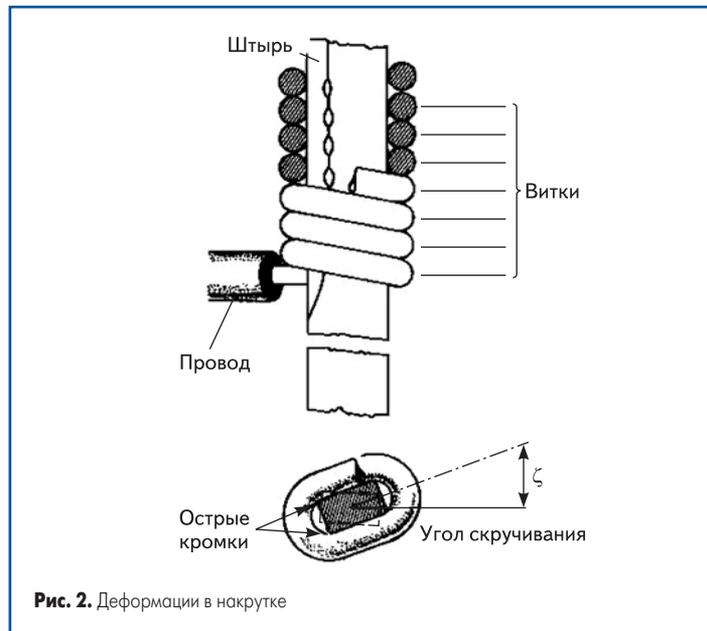


Рис. 2. Деформации в накрутке

ботан в начале 50-х годов в США и достаточно широко применяется для электрического монтажа блоков, панелей и рам. Перечислим его достоинства:

- исключает применение припоев и флюсов;
- повышает надежность соединений по сравнению с паяными при механических и климатических воздействиях;
- ускоряет процесс электрического монтажа аппаратуры;
- создает условия для его автоматизации.

Контактное соединение накруткой

Контактное соединение накруткой — соединение неизолированного провода (участка провода) с выводом, имеющим острые кромки, при котором провод навивается на вывод с определенным усилием (рис. 1). Электрическое соединение 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 соединения (рис. 3). Возможно соединение накруткой с применением провода с тонкой изоляцией. Тогда изоляция прорезается острыми кромками вывода. Концентрация напряжения в зонах контакта и среднее давление порядка 700 МПа обуславливают взаимную диффузию металлов.

Соединение накруткой должно удовлетворять следующим требованиям:

- 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.

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 деформи-

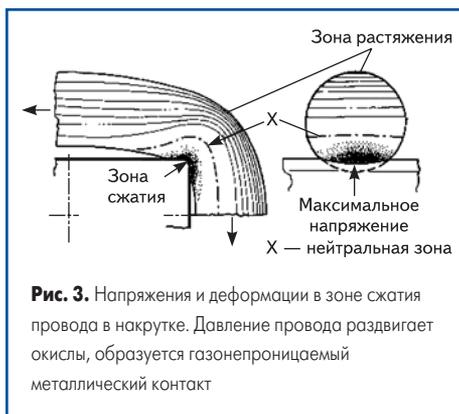


Рис. 3. Напряжения и деформации в зоне сжатия провода в накрутке. Давление провода раздвигает окислы, образуется газонепроницаемый металлический контакт

рования 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:

- 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, которые:

- предохраняют поверхности от окисления;
- способствуют процессу диффузии металлов;
- определяют значения переходного сопротивления.

Выводы из латуни и бронзы, предназначенные для специальной электронной аппаратуры, покрывают гальваническим золотом (3–6 мкм) с предварительным серебрением (9–12 мкм). Применяют серебрение (6–9 мкм) по никелевому покрытию (1–3 мкм). Для обычной аппаратуры выводы получают 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 освобождается от изоляции и облуживается. Кроме меди, используют латунь, никелевое железо и никелевую проволоку.

Для равной прочности элементов соединений необходимо обеспечить равенство суммы площадей контакта провода со штырем и площади поперечного сечения провода. Это, как правило, обеспечивается 16–20 точками контактирования в зависимости от диаметра провода. Следовательно, соединение должно быть многovitковым.

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 электрических, 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 составляет 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-образной и V-образной формой поперечного сечения. Наибольшее распространение получили квадратные и прямоугольные выводы, причем квадратные предоставляют ряд преимуществ при автоматизации монтажа накруткой.

U-образные 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 °С. 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:

- диаметром провода;
- числом витков в соединении;
- 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 контактирования на виток, V-образной и треугольной — три, U-образной — 2,5. Две первые и две последние точки контакта на первом и на последнем витках 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 отой-

ти от другого угла, то потянет первый угол к центральной точке штыря, там остановится, и, таким образом, провод после второго края уже не отделается. И провод вследствие асимметричности сечения штыря самоблокируется.

При монтаже накруткой применяют три вида соединений: обычное (немодифицированное), модифицированное и бандажное (рис. 1).

Немодифицированное соединение получают путем навивки на вывод неизолированного участка одножильного провода.

Модифицированное соединение отличается от немодифицированного наличием 1–2 витков изолированного провода. Изоляция снижает вероятность поломки первого витка провода при механических воздействиях (вибрации, смещении вывода) за счет уменьшения концентрации напряжения в точках контакта. Но габариты такого соединения увеличиваются по сравнению с обычными. Поэтому, когда шаг выводов для накрутки становится меньше 2,5 мм, применение модифицированного соединения становится затруднительным.

Бандажное соединение состоит из нескольких витков бандажной проволоки. Провод при накручивании захватывает и обжимает штырь и вывод (провод, вывод, шина и пр.). 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 больше, 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 явления релаксации (в данном случае — холодной текучести). Испытания на долговечность демонстрируют, что в соединениях накруткой давление не опускается ниже 50% от исходного состояния спустя годы. И такое давление контактирующих поверхностей достаточно для обеспечения необходимой постоянной величины высокой проводимости.

Если на штырь производится не одна, а три накрутки, каждая из последующих накруток ослабляет предыдущую на 10–20%. Если соотношение размеров поперечного сечения штыря и диаметра и пластичности провода выбраны неправильно, первая (нижняя) накрутка может оказаться настолько ослабленной, что сойдет 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 (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 ин-

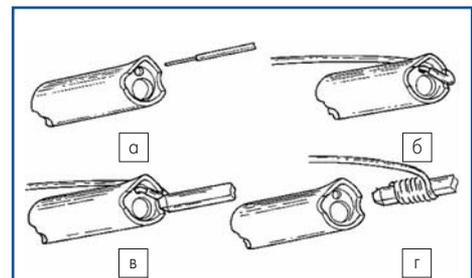


Рис. 4. Последовательность операций накрутки:

- оправка и зачищенный провод;
- провод введен в захватывающее отверстие и фиксируется в оправке;
- оправка с проводом наводится на штырь, включается вращение оправки;
- накрутка выполнена



Рис. 5. Инструмент для накрутки
в руках оператора:

1 — курок инструмента; 2 — оправка; 3 — шпindelь

струмента) около 2,5 с. Поэтому, если провода для накрутки уже подготовлены и разложены по ячейкам кассы, производительность 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 надиктовывают оператору с магнитофона. Заодно чтение адресов накладывают на музы-

ку или радиопостановки, чтобы скрасить оператору монотонность его труда.

При полуавтоматическом монтаже используется программа, которая помогает находить штыри с помощью сигнальных ламп, числовых индикаторов или координатным позиционированием, то есть 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 накруткой исчезла, поэтому автоматические линии соединений накруткой постепенно выводятся из производства.

Сегодня накрутка широко используется для реализации переменной части монтажа на унифицированных платах, когда нужно создавать модификации изделий за счет добав-

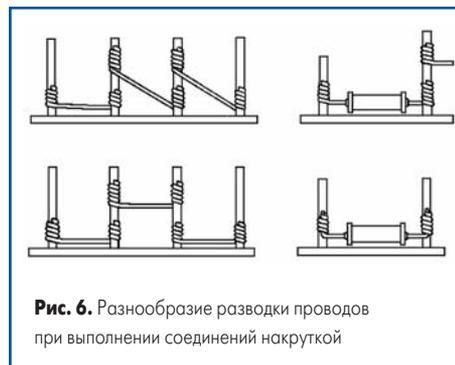


Рис. 6. Разнообразие разводки проводов при выполнении соединений накруткой

ления 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, то есть пайкой накрученного провода. На одном штыре можно также разместить и паяное соединение многожильного провода, и накрученный одножильный провод (рис. 6). Пайка, по понятным соображениям, должна предшествовать накрутке.

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