

# Надежность прижимных соединений силовых модулей

## в условиях агрессивных индустриальных сред

Одним из наиболее интересных конструкторских решений, применяемых в силовых модулях SEMIKRON, является использование пружинных контактов. Пружинные контакты предназначены для коммутации широкого диапазона токов: от единиц миллиампер в сигнальных соединениях до десятков ампер в силовых цепях. Несмотря на широкое промышленное использование модулей прижимной конструкции, многие специалисты продолжают сомневаться в надежности такого способа подключения, особенно в условиях жестких внешних воздействий. В настоящей статье приводятся результаты исследования влияния агрессивных сред на стабильность контактных характеристик прижимных соединений.

Андрей Колпаков

Andrey.Kolpakov@semikron.com

Введение

Каждый раз, когда встает вопрос о надежности прижимных контактов, они сравниваются, прежде всего, с традиционными разъемными сочленениями или паяными соединениями.

В силовой электронике для подключения терминалов мощных модулей широко используется прижимное резьбовое соединение (рис. 1а) и его следует рассмотреть в первую очередь, коль скоро мы говорим о технологии прижима. В широком смысле любое прижимное сочленение является пружинным.

Резьбовое соединение характеризуется высоким контактным усилием, номинальное значение которого для силовых модулей составляет примерно  $50 \text{ Н/мм}^2$ . Особенности данного вида сочленения связаны со сложной структурой области контакта. На рис. 2 изображена модель контактной поверхно-

сти, соответствующая данному случаю. Зона сопряжения является по большей части «виртуальной», поскольку вследствие шероховатости поверхности действительное соприкосновение контактирующих частей происходит только на отдельных участках. Выступы на поверхности «контактных партнеров» можно рассматривать как конусы со сферическими вершинами, располагающиеся на некоторой волнистой поверхности.

Действительная поверхность соединения двух проводников состоит из контактных участков (пятен) с металлическим контактом, электрическое сопротивление которых определяется удельным сопротивлением металлов, через которые протекает электрический ток, а также контактных пятен с квазиметаллическим контактом, покрытым тонкими адгезионными пленками, которые пропускают электрический ток благодаря туннельному эффекту. Таким образом, контактная система в данном случае состоит из участков с различной электропроводностью.

Реальная поверхность электрического контакта меньше действительной поверхности сопряжения, поскольку на ней имеются контактные пятна с практически непроницаемыми пленками окислов, сульфидов и т. п. В результате, несмотря на сравнительно большую площадь зоны соединения, ток может протекать через небольшие области с низким переходным сопротивлением (номинальное значение  $8,8 \times 10^{-4} \text{ Ом}$ ). В литературе их часто называют точками проводящего контакта или A-spots, они имеют радиус около  $10 \text{ мкм}$ , что соответствует допустимой плотности тока  $20 \text{ А}$ .

Конструкция пружинного прижимного соединения принципиально отличается от всех прочих, различаются механизмы работы и причины отказов рассматриваемых типов соединений. В традиционном разъемном сочленении осуществляется «сжимающее» контактное усилие, как показано на рис. 1б. Отличие заключается, прежде всего, в направлении

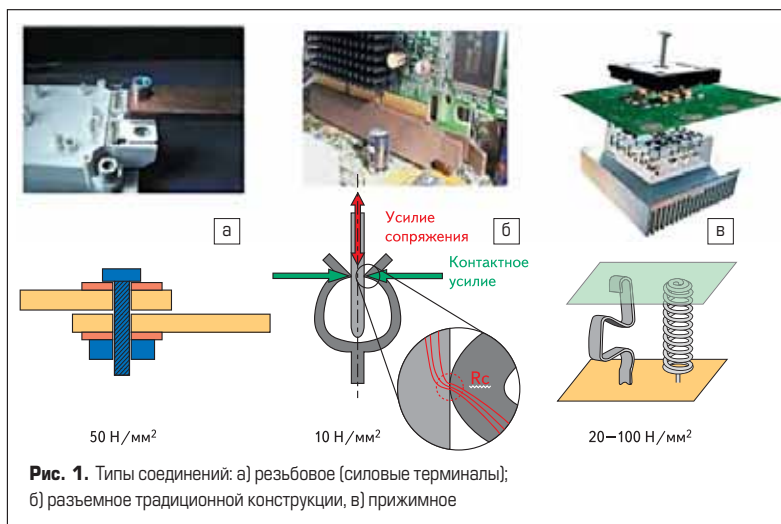
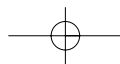


Рис. 1. Типы соединений: а) резьбовое (силовые терминалы); б) разъемное традиционной конструкции, в) прижимное



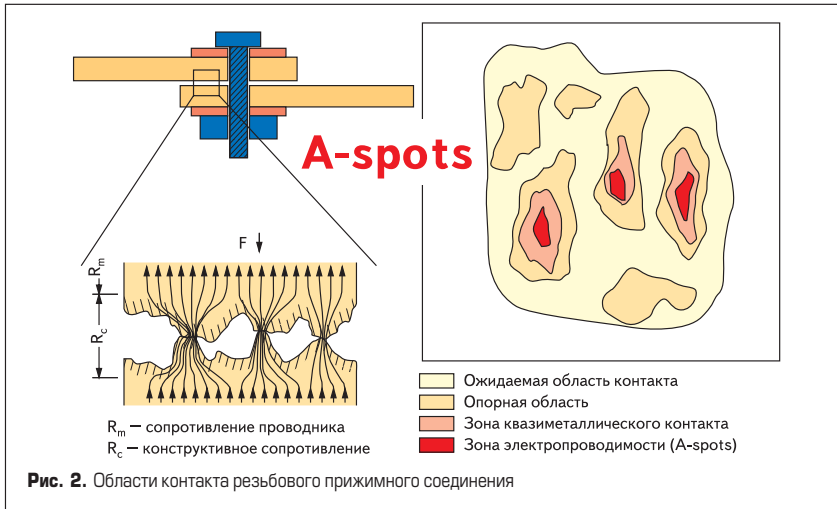
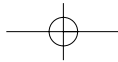


Рис. 2. Области контакта резьбового прижимного соединения



Рис. 3. Прижимная сборка модуля MiniSKiiP, схема измерения контактного сопротивления

распределения прижимающего и контактного усилия. У обычной контактной пары прижим создается за счет пружинящих свойств контактов, «сжимающих» токонесущий проводник. Усилие в этом случае ограничено упругостью пары сопрягающихся контактов, со временем оно неизбежно ослабевает из-за усталостных процессов. Такая конструкция продиктована необходимостью обеспечения большого количества циклов сочленения.

Пружинные контакты, используемые в модулях SEMIKRON (рис. 16), создают давление, направленное вдоль оси контакта. Значение контактного усилия в этом случае оказывается гораздо больше, а усилие сопряжения отсутствует. Зона электрического контакта образуется в месте соединения пружины с контактной площадкой печатной платы, и в зависимости от типа пружины значение контактного усилия находится в диапазоне 20–100 Н/мм<sup>2</sup>. Данная технология разрабатывалась специально для подключения силового модуля к плате управления, и она не рассчитана на большое количество сочленений в отличие от обычных разъемов. SEMIKRON использует два основных типа пружинных соединителей, показанных на рис. 1в: спиральные контакты, допускающие ток до 3 А, применяются для сигнальных подключений в модулях SEMiX, плоские контакты MiniSKiiP, рассчитанные на ток до 20 А, работают в качестве сигнальных и силовых.

На рис. 3 показана сборка модуля MiniSKiiP и схема, используемая для проверки контактных свойств прижимного соединения. На рисунке хорошо видна необычная форма контак-

тов с П-образным изгибом в средней части, обеспечивающим гибкость сочленения, и полукруглый изгиб в области соединения с платой. Особенностью конструкции MiniSKiiP является то, что пружинные контакты у них используются как для сигнальных, так и для силовых подключений. Стабильность контактного сопротивления определяется по падению напряжения в цепи, в которой несколько пружинных контактов, последовательно соединенных через шины DBC-пластины, подключены к контактным площадкам тестовой печатной платы (PCB на рис. 3).

В соответствии с указаниями директивы RoHS в производственных процессах SEMIKRON используются только экологически чистые технологии, исключая применение таких опасных для здоровья металлов, как ртуть, кадмий, шестивалентный хром, свинец. Для выполнения требований RoHS свинцово-оловян-

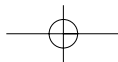
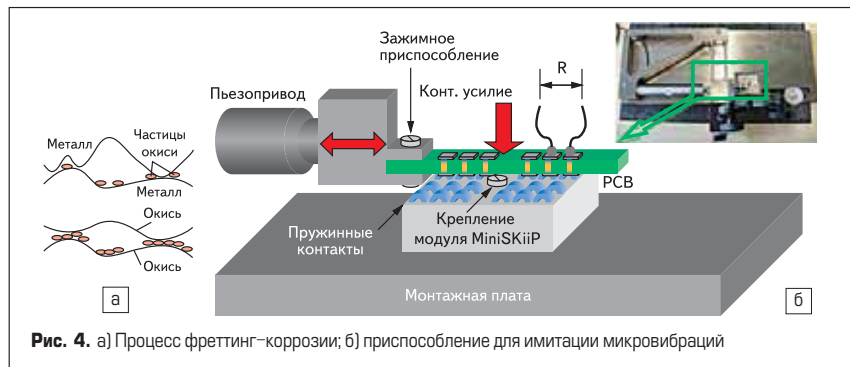
ные сплавы, используемые для металлизации дорожек печатных плат (технология SnPb HAL), заменены на экологически чистые материалы: иммерсионное олово или никель-золотой сплав NiAu. Необходимая толщина и равномерность слоя достигается, как правило, с помощью технологии выравнивания при помощи горячим воздухом (в англоязычной литературе эта технология называется HAL — Hot Air Leveling).

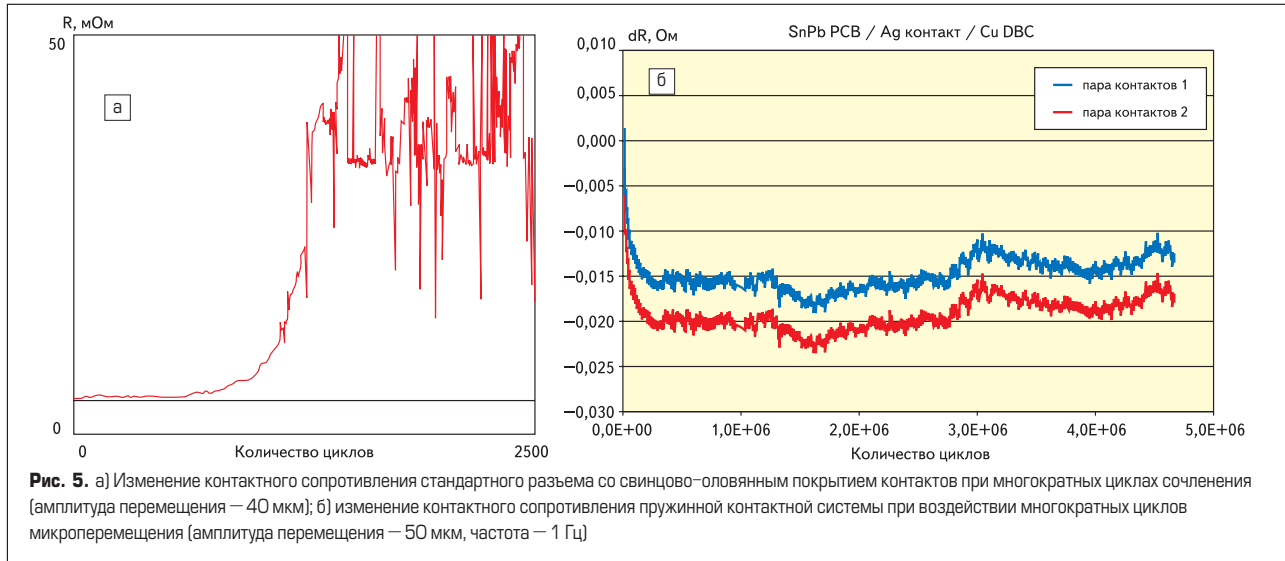
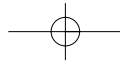
Базовым материалом для изготовления контактов служит пружинная медь, а для обеспечения надежного и стабильного соединения с печатной платой на контакты наносится олово, серебро или сплав никель-золото. Медные шины керамической DBC-платы модуля покрываются тонким слоем никеля или сплава NiAu. Выбор материала покрытия пружинного контакта, определяющего его контактные свойства, в первую очередь зависит от усилия сопряжения. Очень надежными и стабильными «контактными партнерами» считаются золото и серебро. Однако допустимое контактное усилие для золотого покрытия достаточно мало (< 5 Н), в то время как серебро допускает усилие до 20 Н, следовательно, посеребренные контакты имеют и более высокую стойкость к механическим воздействиям. Оловянные покрытия используются в диапазоне от 2 до 20 Н. В соответствии с требованиями, предъявляемыми к усилию сопряжения в различных модулях SEMIKRON, оптимальным покрытием для плат управления MiniSKiiP II является серебро. Золото применяется для металлизации контактных площадок драйверов в интеллектуальных силовых модулях SKiiP 3.

Наиболее важными видами внешних воздействий, стойкость к которым должна быть проверена в первую очередь, являются вибрации, перепады температуры, предельные рабочие температуры и коррозионно-активная атмосфера. Надежность прижимного соединения определяется способностью сохранять контактные свойства в условиях указанных воздействий.

Одной из главных проблем соединения, осуществляемого за счет прижима, является так называемая фреттинг-коррозия, вызываемая трением. Феномен фреттинга достаточно хорошо изучен в отношении обычных разъемных соединений. Устойчивость к нему является одним из основных критериев при выборе материалов контактов, используемых в разъемах.

Каждый цикл микроперемещения приводит к истиранию и абразивному удалению





частиц окисного покрытия из зоны сопряжения контактов. В результате образуется новая контактная поверхность, имеющая высокую склонность к окислению. Вследствие многократного повторения этого процесса возникает естественный слой толщиной в несколько нанометров, состоящий из окисных частиц. Проникновение этих вкраплений в зону сопряжения раздвигает контактные поверхности и увеличивает контактное сопротивление, как показано на рис. 4а.

Олово, часто используемое для покрытия контактных пар традиционных разъемов, является чрезвычайно чувствительным к фреттингу. Низкое контактное усилие при использовании мягкого металла приводит к многократному увеличению контактного сопротивления после менее тысячи циклов сочленения, что демонстрирует график, приведенный на рис. 5а. Многочисленные исследования процесса фреттинга, проводимые в применении к разъемным соединениям, помогли свести этот эффект к минимуму при разработке технологии пружинных контактов и обеспечить высокую стойкость к микровибрациям.

Для воспроизведения микросдвигов, вызываемых вибрациями или тепловым расширением материалов, было разработано специальное приспособление с пьезоэлектрическим

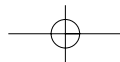
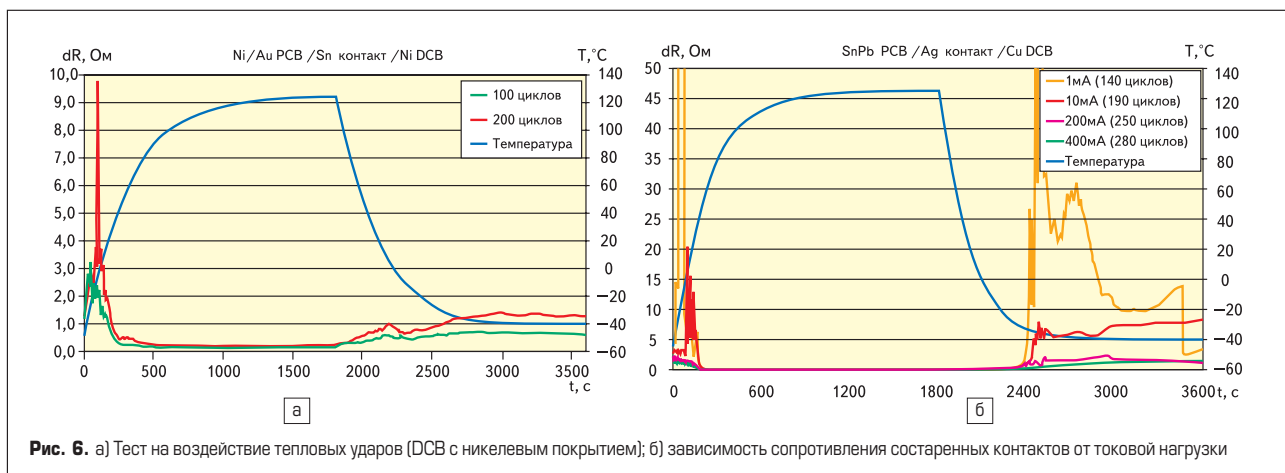
приводом, позволяющее перемещать печатную плату относительно контактирующего с ней модуля MiniSKiP и регулировать усилие прижима, частоту и амплитуду вибраций. Внешний вид устройства показан на рис. 4б. Исследования стабильности переходного сопротивления пружинных контактов, проведенные с помощью данного приспособления, продемонстрировали гораздо более высокую сопротивляемость фреттингу. Графики, показывающие изменение контактного сопротивления  $dR$  относительно начального значения для двух пар пружинных контактов, приведены на рис. 5б. В данном тесте проводники печатной платы имеют свинцово-оловянную металлизацию, пружинные контакты изготовлены из серебра, медные токонесущие шины DCB-керамики работают без покрытия.

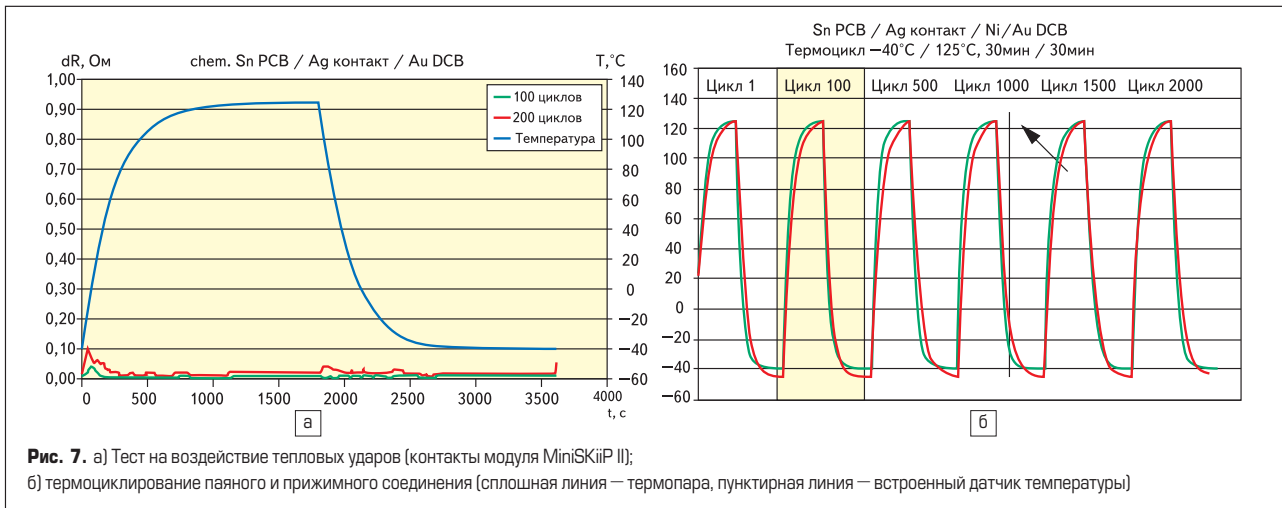
В начале тестов наблюдается некоторое снижение сопротивления, что объясняется эффектом «самоочистки» сопрягающихся областей. Как видно из приведенных кривых, обе контактные пары имеют стабильное переходное сопротивление даже после 4,65 млн циклов микроперемещений. Такой результат обусловлен большим значением контактного усилия, развиваемого пружинной парой, формой пружинных контактов и выбором материалов для их изготовления и покрытия.

Для оценки долговечности прижимного соединения используется тест на воздействие тепловых ударов или термоциклирование. Резкие изменения температуры приводят к взаимным перемещениям материалов с различными коэффициентами теплового расширения (КТР), что ускоряет процесс износа сопрягающихся материалов. В результате воздействия тепловых стрессов изменяется усилие сопряжения контактов, их взаимная ориентация и состояние контактной области.

На рис. 6а представлен график относительного изменения контактного сопротивления в пределах одного теплового цикла с градиентом от  $-40$  до  $125$  °С. Значение температуры в процессе воздействия регистрировалось с помощью термодпары, припаянной к поверхности контакта. В качестве материала металлизации печатной платы в данном тесте использован сплав никель-золото, пружинные контакты покрыты оловом, токонесущие шины DCB имеют никелевое напыление.

Испытания показали, что различные сочетания материалов проявляют различную степень чувствительности к тепловым воздействиям, что выражается в соответствующем изменении переходного сопротивления. В примере, приведенном на рис. 6а, контактное сопротивле-





ние цепочки с участием DCB-платы с никелевым покрытием растёт из-за окисления слоя металлизации.

Стабильность характеристик пружинного соединения во многом зависит от условий эксплуатации. Например, при больших токах нагрузки или высоких перепадах напряжения контактная пара работает более надёжно в течение длительного времени. Однако пружинные контакты используются, как правило, для слаботочных и низковольтных соединений. В этом случае любые изменения поверхностных свойств сопрягаемых материалов могут повлиять на их контактные характеристики. Колебания переходного сопротивления более выражены у сопрягающихся поверхностей с тонкослойным покрытием (как в случае пружинных контактов).

Для следующих испытаний была использована комбинация материалов, контактное сопротивление которых существенно возросло после длительного хранения. Контроль сопротивления производится при нескольких значениях измерительного тока  $I_{cont}$  в диапазоне от 1 до 400 мА. Полученные графики (рис. 6б) показывают, что с увеличением тока контактное сопротивление снижается весьма существенно. Тесты, проведенные при больших значениях длительного тока, подтверждают полученный результат: при  $I_{cont} = 6$  А практически

не было выявлено изменения сопротивления контактной пары в течение более 200 циклов.

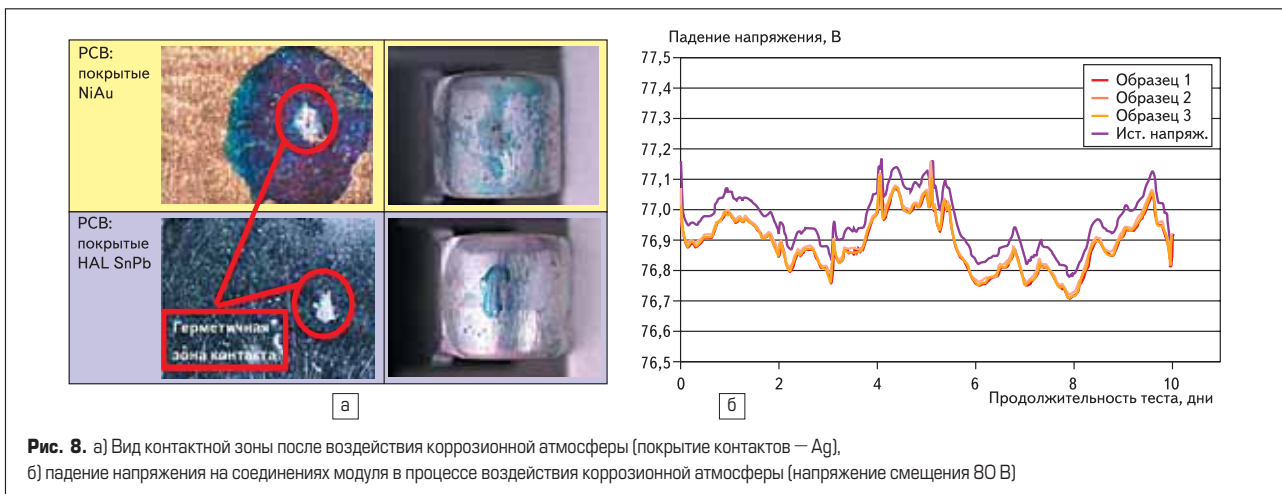
В малогабаритных силовых модулях MiniSKiiP пружинные контакты используются для подключения как силовых, так и сигнальных цепей. С этой точки зрения модули данного типа являются идеальным объектом для исследования. Тщательный выбор материалов контактных пар и оптимизация их конструкции обеспечивают высокую стабильность контактных свойств, подтвержденную тестами. Считается, что 100 термоциклов с предельным перепадом температуры оказывают на силовую модуль такое же действие, как и его работа в реальных условиях эксплуатации в течение всего срока службы. Измеренное максимальное изменение суммарного контактного сопротивления восьми последовательно соединенных контактов (или 16 контактных пар) MiniSKiiP не превышает 100 мОм даже после 200 испытательных циклов. В качестве материала покрытия печатной платы было использовано химическое олово, пружинных контактов — серебро (Ag), токонесущие шины DCB-керамики имели золотое напыление.

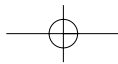
Пружинное подключение термодатчика MiniSKiiP работает в условиях постоянных малых токов. Изменение контактного сопротивления такого соединения на 10 Ом эквивалентно ошибке измерения температуры

примерно на 1 °С. Для сравнения пружинной контактной системы с паяным соединением были произведены измерения сигналов интегрированного термодатчика MiniSKiiP, подключаемого с помощью пружинных контактов, и термодары, припаянной к контактной системе. Такая схема проверки гарантирует одинаковые условия испытаний для соединений обоих типов. Тесты проводились в условиях воздействия продолжительных термоциклов (30 мин/30 мин).

На рис. 7б представлены результаты измерений для некоторых фиксированных номеров циклов. Значения, полученные с помощью термодары и термодатчика, несколько отличаются, что объясняется разницей их теплоемкости. Сигнал термодатчика остается стабильным в течение 2 тыс. циклов воздействия предельного перепада температуры, что эквивалентно примерно 40 тыс. реальных рабочих термоциклов. Паяное соединение термодары разрушилось после 1 тыс. циклов (показано стрелкой), после чего термодары была заменена.

Обязательным видом испытаний, необходимым для подтверждения надежности пружинных соединений в условиях промышленных применений, является проверка на устойчивость к воздействию агрессивных коррозионных сред. Первые тесты такого рода проводились в соответствии со стандартом





DIN EN 60068-2-43 Kd (10 млн<sup>-1</sup> H<sub>2</sub>S, 10 дней, влажность 75%, 25 °C). Указанный класс воздействий относится к ускоренным испытаниям повышенной категории жесткости. Условия испытаний были разработаны специально для оценки стабильности свойств контактов с серебряным покрытием при наличии оксидной пленки и без нее. Как и ожидалось, незначительные следы окиси наблюдались на всех серебряных поверхностях, подвергнутых воздействию агрессивного газа. Благодаря высокому контактному усилию пружинного соединения в зоне сопряжения контактной пары образуется так называемая область «холодной сварки», практически непроницаемая для внешних воздействий (см. рис. 8а). Исследования, проведенные с помощью сканирующего электронного микроскопа, подтвердили, что пружинные контакты обладают высокой стойкостью к воздействию коррозионно-активной атмосферы. Это подтвердил и энергорассеивающий рентгеновский анализ (EDX analysis), показавший, что в зоне пятна контакта, отмеченной на рис. 8а, следы продуктов коррозии не наблюдаются.

Отсутствие видимых признаков коррозии является одним из критериев при проведении теста на устойчивость к коррозионно-активной атмосфере. Для количественной оценки надежности соединения производится мониторинг контактного сопротивления до и после испытаний. Измеренные значения переходного сопротивления контактной системы MiniSKiP при различном сочетании материалов и различных видах воздействия оказались гораздо ниже допустимого уровня.

Испытания, проводимые в соответствии со стандартом IEC 60068-2-60 Ke (метод 3), позволяют проверить качество и надежность соединения пружинного контакта с серебряным покрытием и печатной платы в условиях воздействия различных агрессивных газов, виды и концентрация которых приведены в таблице. При этих испытаниях предельно допустимым считается изменение суммарного напряжения на контактах не более 20 мВ при пропуске тока 10 мА.

Для подтверждения надежности контактов с золотым покрытием эти соединения подвергались испытаниям по стандарту IEC 60068-2-60 Ke (метод 4). Для сопоставления качества разных типов покрытий проводились тесты с использованием различных сочетаний газов, указанных в таблице.

В соответствии со стандартом ISA-S71.04-1985, классифицирующим надежность электрической и электронной аппаратуры в условиях

**Таблица.** Условия испытаний на воздействие агрессивных сред

Параметр	IEC 60068-2-60, Метод 3	IEC 60068-2-60, Метод 4
Температура	30 °C	25 °C
Влажность	75%	75%
Продолжительность теста	21 день	21 день
Сероводород (H <sub>2</sub> S)	0,1 млн <sup>-1</sup>	0,01 млн <sup>-1</sup>
Двуокись азота (NO <sub>2</sub> )	0,2 млн <sup>-1</sup>	0,2 млн <sup>-1</sup>
Хлор (Cl <sub>2</sub> )	0,02 млн <sup>-1</sup>	0,01 млн <sup>-1</sup>
Сернистый газ (SO <sub>2</sub> )	x	0,2 млн <sup>-1</sup>



**Рис. 9.** Нарастание нитевидных кристаллов Ag<sub>2</sub>S на поверхности пружинного контакта (длина до 40 мкм)

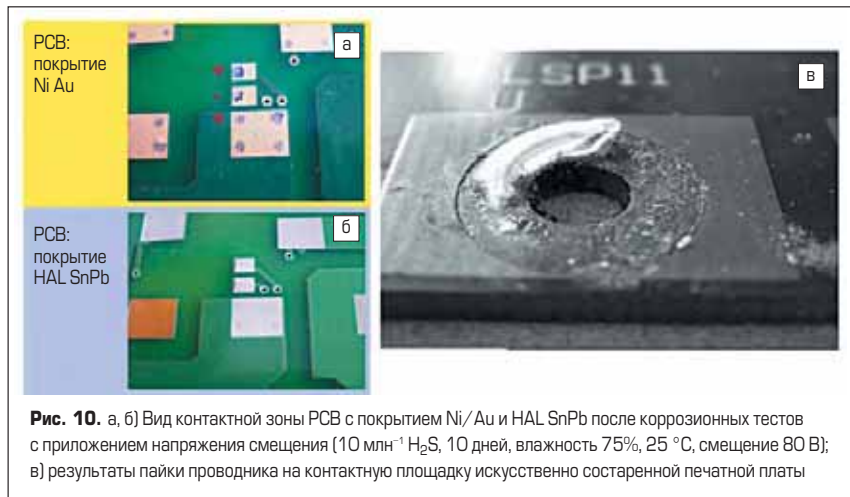
воздействия агрессивных сред, оба типа используемых в SEMIKRON методов испытаний относятся к коррозионным тестам высшей степени воздействия. Таким образом, полученные результаты подтверждают высокую степень надежности пружинных контактов при работе в самых жестких условиях эксплуатации, включая работу в экстремально загрязненных промышленных средах.

Для подтверждения долговременной стабильности контактных свойств прижимного соединения проверялась его стойкость к процессам нарастания нитевидных кристаллов и электромиграции. Чистое серебро обладает высокой степенью химического сродства с серой. Результатом этого может быть появление нитевидных кристаллов сульфида серебра в зоне контакта. Причиной нарастания кристаллов является сжимающее напряжение в сопрягающихся металлических структурах. Скорость роста кристаллов на серебре многократно увеличивается при наличии в атмосфере агрессивных газов. На рис. 9 показана поверхность пружинного контакта с нитевидными кристаллами. Лучшим способом защиты в данном случае является металлическая пассивация, обеспечивающая высокую долговременную стабильность контактных свойств и предохраняющая поверхность контакта от окисления, нарастания нитевидных кристаллов и электромиграции.

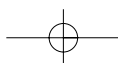
Электромиграцией называется процесс диффузионного переноса массы проводника под действием электрического тока высокой плотности, она является одной из основных причин разрушения металлических токопроводящих пленок.

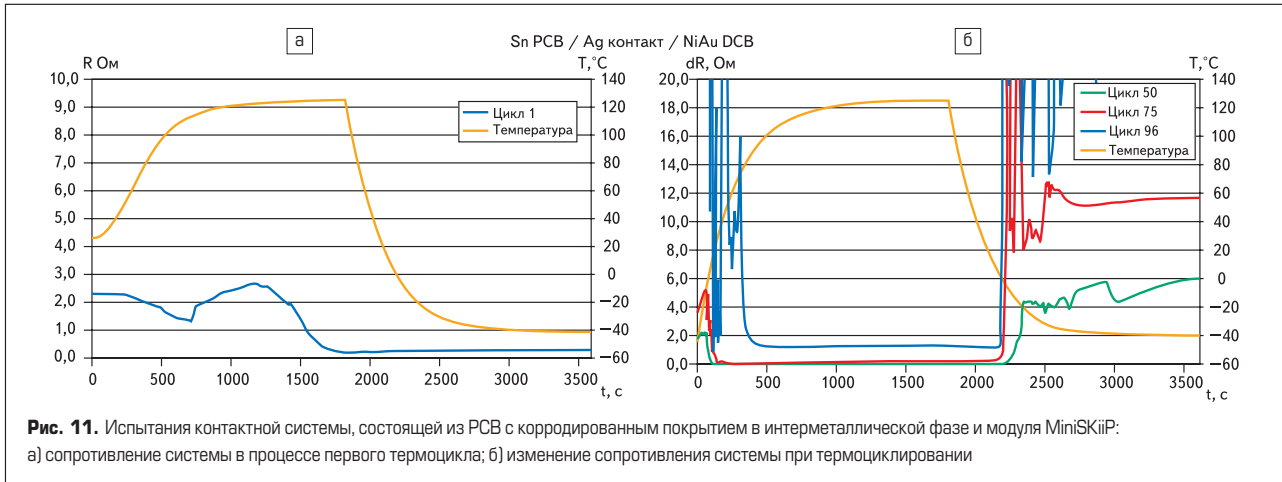
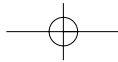
Электромиграция не обязательно приводит к ухудшению контактных свойств проводника, однако она может явиться причиной образования паразитных электрических связей. Любая металлическая поверхность подвержена непосредственной коррозии. Ионы металла, образующиеся в процессе коррозии, так же как и анионы, поставляемые любым другим источником, способны мигрировать в электрическом поле. При наличии проводящей поверхности с отрицательным потенциалом анионы могут оседать на ней и формировать токопроводящие металлические дендриты. Этому способствуют различные факторы, в том числе интенсивность коррозии, смачиваемость изоляционного слоя между потенциальными поверхностями, подвижность ионов металла, состав электролита.

Для оценки влияния феномена электромиграции на контактную систему MiniSKiP в процессе испытаний на воздействие агрессивных газов напряжением смещения 80 В было приложено к наиболее близко расположенным точкам подключения пружинных контактов на печатной плате РСВ (рис. 10а). Оценка производилась с помощью мониторинга напряжения на контактах модуля, поскольку возникающие в процессе электромиграции паразитные токопроводящие пути могли бы привести к резкому падению напряжения. В отличие от проверки сопротивления изоляции в данном виде испытаний тестировалась сборка модуля MiniSKiP и печатной платы. Это позволило оценить одновременно всю контактную систему, включающую пружинные контакты, а также контактные площадки и токопроводящие шины платы и DBC-керамики. Результа-



**Рис. 10.** а, б) Вид контактной зоны РСВ с покрытием Ni/Au и HAL SnPb после коррозионных тестов с приложением напряжения смещения (10 млн<sup>-1</sup> H<sub>2</sub>S, 10 дней, влажность 75%, 25 °C, смещение 80 В); в) результаты пайки проводника на контактную площадку искусственно состаренной печатной платы





ты мониторинга напряжения, проводимого более 10 дней, продемонстрированы на рис. 8б. Приведенные кривые показывают, что в измененном напряжении на контактах провалы отсутствуют, оно повторяет форму сигнала источника напряжения.

Оптическая инспекция состояния модулей, проведенная после окончания тестов, выявила следы коррозии на поверхности пружинных контактов и токопроводящих шин печатной платы, однако все они находились вне зоны контакта. Энергорассеивающий рентгеновский анализ обесцвеченных областей контактных площадок подтвердил, что контактное пятно свободно от следов коррозии, а соседние области покрыты сульфидами  $Ag_2S$  и  $Cu_2S$ . Продукты коррозии распространялись по золотой пленке покрытия PCB благодаря поверхностной диффузии меди в золото, скорость которой при взаимодействии этих материалов достаточно высока.

Следует отметить, что медь активно взаимодействует с золотом и серой, именно поэтому золотое покрытие наносится вместе с диффузионным слоем из непористого никеля. Никелевый барьерный слой предотвращает диффузию золота в медь и обеспечивает дополнительную защиту медной основы от сульфидирования.

Аналогичная ситуация после коррозионного теста без подачи напряжения смещения наблюдается в случае контакта позолоченных площадок печатных плат и серебряных пружинных контактов с защитной оксидной пленкой. Наблюдаемый эффект ни коим образом не ухудшает контактных свойств контактной системы, поскольку все коррозионные процессы происходят вне области контакта.

При работе некоторых сочетаний металлов в качестве «контактных партнеров» может наблюдаться явление так называемой интерметаллизации, приводящей к изменению механических свойств материалов. Данному эффекту подвержено олово, чаще всего применяемое для покрытия медных проводников печатных плат. В фазе интерметаллизации могут образовываться оксидные слои, устойчивые к воздействию флюсов, что, естественно, создает проблемы при пайке. Причиной интерметаллизации являются диффузионные процессы, поэтому ее интенсивность зависит

от температуры. Описанная проблема наиболее остро встала после повсеместного отказа от использования свинца, поскольку новые бессвинцовые технологии используют более высокие температуры пайки. Между снижением толщины оловянного покрытия и температурой существует соотношение:

$$\Delta d_{Sn} = 0,125e^{(428-T)/17},$$

где  $d_{Sn}$  — снижение толщины слоя олова,  $T$  — температура пайки в кельвинах.

Приведенная формула справедлива для фазы образования соединения  $Cu_xSn_y$  при температуре от 20 до 330 °C, в соответствии с ней срок хранения печатных плат с покрытием Sn HAL и химическим иммерсионным оловом (Chem. Sn) ограничивается на уровне 6 месяцев, после чего они считаются малоприспособными для паяных соединений.

Модули с пружинными контактами, предназначенные для соединения без применения пайки, а также прижимные сборки их на основе имеют несоизмеримо более высокий срок службы и хранения. Для подтверждения надежной работы пружинных соединений после длительного срока хранения они подвергаются специальным тестам на ускоренное старение, которые проводятся в следующей последовательности:

- Хранение печатных плат с покрытием Sn HAL и Chem. Sn в течение 90 часов при температуре 150 °C. Оба типа плат тестируются без соединения и установки SMT-компонентов.
- Хранение сборок печатных плат в коррозионно-активной атмосфере ( $0,4 \text{ млн}^{-1} \text{ H}_2\text{S}$ ;  $0,4 \text{ млн}^{-1} \text{ SO}_2$ ;  $0,5 \text{ млн}^{-1} \text{ NO}_x$ ;  $0,1 \text{ млн}^{-1} \text{ Cl}_2$ ; 25 °C; влажность 75%) в течение 21 дня.
- Термоциклирование контактной системы при постоянном токе нагрузки 1 МА.

Первый этап гарантирует, что на поверхности не остается чистого олова, и интерметаллид  $Cu_xSn_y$  присутствует в слое металла. Хранение в описанных условиях эквивалентно расчетной потере 8,4 мкм оловянной интерметаллизации, что значительно больше толщины реального покрытия печатной платы иммерсионным оловом (примерно 1,2 мкм).

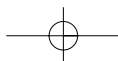
На втором этапе испытаний контактная система в фазе образования интерметаллидов подвергается экстремальному воздействию

смеси агрессивных газов. На заключительной третьей стадии производится измерение контактного сопротивления по падению напряжения на контактной системе при пропускании через нее постоянного тока.

Как было указано выше, печатная плата со старым покрытием практически не поддается пайке. На рис. 10б показаны результаты неудачной попытки пайки проводника на контактную площадку печатной платы, подвергнутой длительному хранению при высокой температуре с последующим воздействием коррозионной атмосферы. Без механической очистки или применения агрессивного припоя паяное соединение с подобной поверхностью невозможно, так как контактная площадка практически не смачивается припоем. Отметим, что в результате искусственного старения поверхность PCB получила повреждения гораздо более серьезные, чем обычно наблюдаются у печатных плат, много лет отработавших в реальных условиях.

Термоциклирование является основным видом испытаний, позволяющим подтвердить надежность и стабильность параметров соединения в реальных условиях применения. Испытаниям на термоциклирование была подвергнута контактная система, состоящая из «экстремально» состаренной печатной платы и модуля MiniSKiIP, в котором 8 контактов соединялись последовательно. Температура изменялась от -40 до +125 °C, тестируемая сборка включала печатную плату с покрытием из олова и модуль MiniSKiIP (пружинные контакты с серебряным покрытием, шины DCB-керамики — NiAu). Контактное сопротивление определялось по общему падению напряжения цепи после 1, 50, 75 и 96 циклов. Полученная величина включает в себя сопротивление контактных пар («пружинный контакт — печатная плата»), «пружинный контакт — медная шина DCB-платы»), омическое распределенное сопротивление шин DCB, а также сопротивление самих пружинных контактов.

Результаты испытаний приведены на рис. 11, где показаны графики температуры цикла и кривая, отражающая изменение суммарного контактного сопротивления R схемы в процессе термоциклирования. В процессе первого цикла наблюдается всплеск значения R, в дальнейшем эта величина стабилизируется



на некотором уровне. Причиной является микроперемещение «контактных партнеров», вызванное разностью коэффициентов теплового расширения.

При многократном термоциклировании сопротивление постоянно увеличивается, что демонстрируют кривые на рис. 11б. Общее значение изменения контактного сопротивления  $dR$  четырех пар пружинных контактов составляет примерно 1,5 Ом в условиях хранения при повышенной температуре. В процессе «холодного хранения»  $dR$  достигает значения 20 Ом. Следует отметить, что такие значения были получены при использовании печатной платы, состояние и форма поверхности которой намного хуже предельно допустимых норм.

Соответствующая ошибка измерений встроенного датчика температуры MiniSKiiP при измерительном токе 1 мА достигает примерно 0,1 °C при повышенной температуре и 2 °C — при пониженной. Поскольку термодатчик, как правило, используется для измерения предельных температур в схеме тепловой защиты, указанные погрешности можно считать допустимыми.

Необходимо отметить, что все описанные измерения производились при токе 1 мА. При большем значении тока, протекающего через прижимные соединения, контактное сопротивление оказывается значительно ниже. На рис. 12 показаны результаты испытаний модулей MiniSKiiP II, имеющих контакты с серебряным пассивированным покрытием, при подключении к «штатной» печатной плате. Кривая, приведенная на рисунке, отражает изменение суммарного контактного сопротивления испытательной схемы в процессе термоциклирования относительно номинального значения. После 100 термоциклов сопротивление достигает максимального значения, соответствующего примерно 60 мОм на контакт, и далее меняется незначительно. По отношению к предельному значению (400 мОм) тест показывает практически двойной запас.

### Заклучение

Применение пружинных сигнальных выводов в силовых модулях позволяет исключить паяные соединения при подключении плат управления и при монтаже самих модулей. Ускоренные испытания сборок модулей прижимной конструкции, проводимые в экстремальных условиях промышленных воздействий, подтверждают высокую стабильность контактных свойств пружинных соединений, а также их устойчивость к микровибрациям, фреттингу, тепловым ударам и воздействию агрессивных газов. По всем указанным показателям прижимные конструкции обеспечивают более надежный контакт, чем соединения, использующие стандартные разъемы или пайку. Первые версии модулей SKiiP с пружинными сигнальными контактами были разработаны компанией SEMIKRON в начале 90-х. В этих модулях с помощью пружин осуществлялось подключение платы драйвера с силовыми каскадами. Внутреннее соединение было «невидимым» для потребителя, поскольку в те времена было необходимо преодолеть мас-

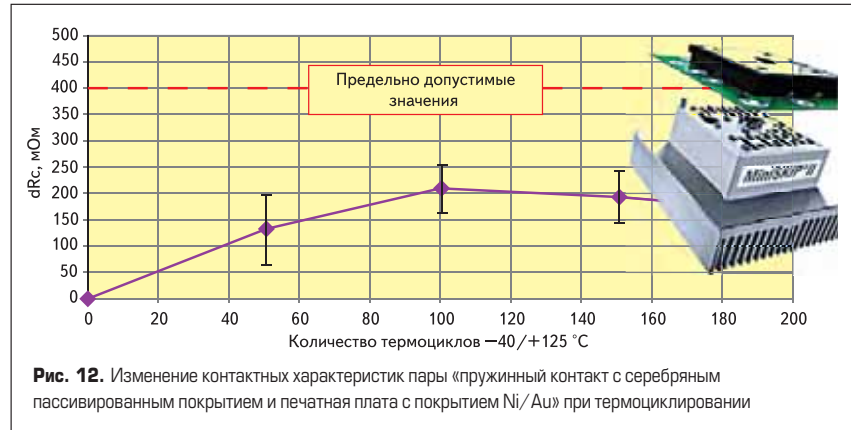


Рис. 12. Изменение контактных характеристик пары «пружинный контакт с серебряным пассивированным покрытием и печатная плата с покрытием Ni/Au» при термоциклировании

совый скепсис и неверие в надежность этой инновации. Испытания образцов показали, что стойкость к термоциклированию SKiiP во много раз превышает показатели, полученные для модулей стандартных конструкций. В 1996 году появились модули серии MiniSKiiP, у которых пружинные контакты предназначались для подключения не только сигнальных, но и силовых цепей. С тех пор идет постоянное развитие и совершенствование технологии прижимного соединения. На данный момент по всему миру в силовых модулях SEMIKRON успешно работает более 300 млн пружин.

Рыночный успех модулей прижимного типа обусловлен их очевидными преимуществами, в первую очередь это:

- удешевление и ускорение процесса сборки благодаря исключению процесса пайки и отсутствию соответствующего оборудования для ее осуществления, меньшие требования к позиционированию модуля относительно печатной платы;
- высокая стойкость к термоциклированию;
- высокая стойкость к вибрационным воздействиям, обусловленная гибкой структурой электрического соединения, отсутствие усталостных эффектов;
- высокая стойкость к воздействию агрессивных коррозионно-активных сред.

Для подтверждения показателей надежности прижимные модули и сборки на их основе проходят различные тесты. Одним из наиболее сложных видов испытаний электрического соединения является термоциклирование при низком значении измерительного тока. Подобные тесты, проводимые с пружинными контактами, показывают незначительное изменение контактного сопротивления в течение длительного периода. При более высоких уровнях тока, характерных для силовых цепей, контактное сопротивление оказывается еще более стабильным.

Пружинные соединения способны успешно работать при воздействии коррозионно-активной атмосферы. Благодаря большому усилию сопряжения и заданной деформации поверхности, зона контакта оказывается практически герметичной, что исключает проникновение в нее агрессивных газов. Тесты, проведенные в агрессивных средах при приложении напряжения смещения, подтвердили отсутствие признаков электромиграции материалов контактной пары.

Появление интерметаллидов на токопроводящих шинах печатных плат приводит к ухудшению качества металлизации, снижает пригодность контактных площадок к пайке. Однако пружинные соединения способны обеспечить надежный электрический контакт даже при использовании плат с состаренным и корродированным покрытием, что подтверждается результатами специальных тестов, приведенными в статье.

Переход к бессвинцовым технологиям потребовал поиска новых материалов и проведения дополнительных испытаний, которые в очередной раз показали преимущества пружинных контактов перед жестким подключением, осуществляемым с помощью пайки. Пружинные выводы в модулях MiniSKiiP II, SKiiP и SEMiX продемонстрировали высокую долговременную стабильность характеристик при работе с печатными платами, имеющими покрытие из сплава никель-золото. В условиях отказа от свинцовосодержащих материалов это позволяет широко применять данные модули в различных областях силовой электроники.

### Литература

1. Frenznick E., Scheuermann U., Daucher C., Wintrich A. Reliability of low current electrical spring contacts in power modules for lead-free applications. SEMIKRON International. 2005.
2. Lang F., Scheuermann U. Long Term reliability of Spring Pin Pressure Contacts in an Industrial Environment. SEMIKRON Elektronik. 2006.
3. Grasshoff T. Spring contacts — a reliable, solder-free electrical contact. SEMIKRON International. 2006.
4. Электрические контакты. Учебно-методическое пособие для студентов специальности 101800 (Электроснабжение). Самара. 2001.
5. Slade P. G. Electrical contacts: principles and application. Marcel Dekker, Inc. 1999.
6. Колпаков А. Миниатюрные модули привода MiniSKiiP II // Силовая электроника. 2005. № 4.
7. Колпаков А. Проблема сигнальных соединений силовых модулей в условиях «бессвинцовых» технологий // Производство Электроники. 2006. № 1.