

Продолжение. Начало в ТвЭП № 5'2006

# Микросварка при производстве микросборок и гибридных интегральных микросхем

Максим Шмаков

mхm-shmakov@yandex.ru

## Сварка косвенным импульсным нагревом

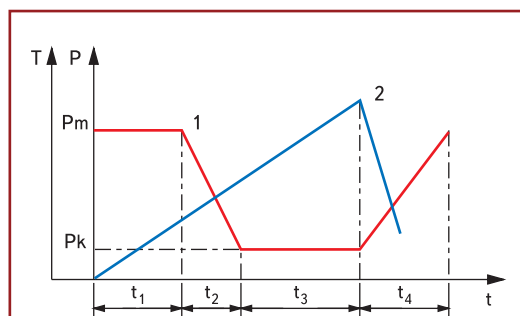
### Вместо определения

Одни считают сварку косвенным импульсным нагревом (СКИН) разновидностью ТКС, другие рассматривают ее как отдельный вид микросварки. Это связано с некоторыми особенностями, в частности с тем, что разогрев рабочей зоны осуществляется только в момент сварки импульсом тока, проходящего непосредственно через инструмент.

### Область применения

Импульсный тип сварки получил широкое применение для внутрисхемных соединений и монтажа навесных элементов с тонкими проволочными выводами. Его параметры приведены на рис. 15. За время  $t_1$ , когда температура пуансона незначительна, подается максимально возможное давление  $P$  для создания в зоне сварки хорошего контакта. При нарастании температуры давление за время  $t_2$  снижается до значения  $P_k$ , необходимого для обеспечения теплового контакта между пуансоном и свариваемыми элементами. Величина  $P_k$  поддерживается в течение времени  $t_3$ , пока температура не достигнет своего максимального значения. Затем нагрев прекращается, место сварки остывает, а давление за время  $t_4$  быстро поднимается до своего первоначального значения для формирования места сварки.

Методом СКИН соединяют золотые, алюминиевые и медные проводники диаметром 20–100 мкм с разнообразными пленками, напыленными на диэлектрические или полупроводниковые подложки.

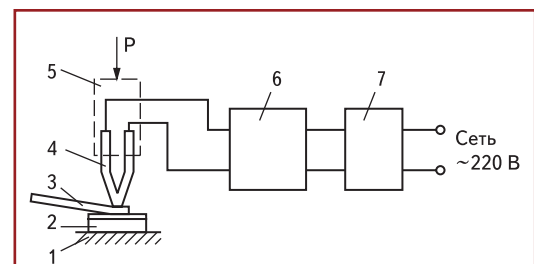


**Рис. 15.** Характеристика параметров импульсной термокомпрессионной сварки:  
1 — давление, 2 — температура

### Процесс образования соединения и параметры СКИН

В отличие от ТКС процесс взаимной диффузии при СКИН играет более существенную роль в образовании соединения. При сварке V-образным инструментом под необходимым давлением приводятся в соприкосновение металлический проводник и подложка или ПП ИС. Затем через инструмент пропускается импульс тока определенной длительности (от 0,01 до нескольких секунд). Торцевая часть инструмента нагревается до определенной температуры, и за счет теплопередачи осуществляется локальный нагрев проводника и подложки. Когда проводник достигает температуры, при которой сопротивление деформации значительно уменьшается, под действием приложенного усилия сжатия произойдет осадка проводника и образуется соединение.

Кратковременность нагрева металлического проводника в месте контакта обеспечивает нагрев до более высоких температур, чем при ТКС. Это позволяет приваривать проводники из относительно малопластичных металлов к тонким пленкам на керамических подложках. СКИН обладает более широкими технологическими возможностями и позволяет получать качественные соединения золотых, алюминиевых и медных проводников (диаметром до 100 мкм) с пленками многих материалов (рис. 16).



**Рис. 16.** Схема СКИН V-образным инструментом:

- 1 — рабочий столик;
- 2 — керамическая подложка или полупроводниковый кристалл;
- 3 — проводник;
- 4 — V-образный инструмент (пуансон);
- 5 — головка для крепления инструмента и создания усилия сжатия;
- 6 — источник питания;
- 7 — реле времени

Таблица 10. Оптимальные режимы СКИН для некоторых сочетаний свариваемых материалов

Сочетание материалов		Значение параметров процессов			Оптимальная деформация, %
Проводник (диаметр, мкм)	Пленка на ситалле	T <sub>к</sub> , °С	P, МПа	t <sub>и</sub> , с	
Au (24–80)	Au, Al, Cu, Ni	300–550	0,8–1,4	0,1–0,5	50–60
Al (30–100)	Au, Al	350–550	0,3–0,8		60–70
Cu (30–80)	Au, Cu	400–650	1,5–2	0,1–1,0	55–65

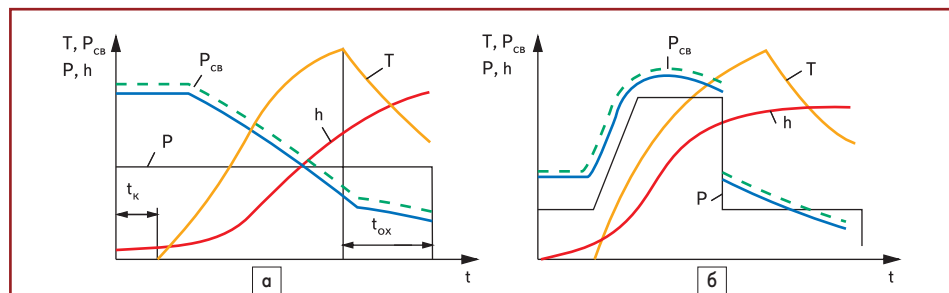


Рис. 17. Характер изменения температуры сварочного контакта T, давления P<sub>св</sub> и осадки проводника h при статической (а) и динамической (б) нагрузках: t<sub>к</sub> — время до включения импульса тока после опускания инструмента на проводник; t<sub>ох</sub> — время от момента прекращения импульса нагрева до подъема инструмента (длительность охлаждения)

При сварке максимальную температуру в любой точке подложки можно с достаточной степенью точности оценить по формуле:

$$T_{\max}(r) \approx \frac{Q}{c \times \rho_{\text{пл}} \times (2 \times \pi \times r^2 / 3)^{3/2}} \times \exp\left(-\frac{r^2 \times b}{a} - \frac{2}{3}\right),$$

где r — расстояние от любой точки подложки до точечного источника тепла; c — теплоемкость подложки; a = λ/(c × ρ<sub>пл</sub>) — коэффициент температуропроводности; Q = 0,24 × U × J × t × η — выделенная теплота при сварочном импульсе; U, J, t — напряжение, ток, длительность, КПД сварочного импульса; b = α[c<sup>1</sup>]/(c × ρ<sub>пл</sub> × δ) — коэффициент, учитывающий теплоотдачу; α — коэффициент полной теплоотдачи; δ — толщина подложки.

Как и при ТКС, при СКИН для каждого сочетания свариваемых материалов существует определенная область значений параметров режимов, в которой можно получить оптимальные свойства (прочность) сварных соединений (табл. 10).

Исследования влияния технологических параметров режима СКИН (температура, давление, длительность) на прочность соединяемых материалов показывают, что максимальная прочность достигается при температуре ~520 °С.

Для снижения напряжений в зоне соединения при сварке материалов, чувствительных к термическому удару, сварку V-образным инструментом выполняют при общем сопутствующем подогреве свариваемых деталей.

При СКИН наблюдается рост прочности соединений начиная с деформации 40%. Быстрый рост прочности наблюдается в том случае, когда в процессе образования соединения интенсифицируется пластическая деформация. Возможные кинетические кривые осадки, температуры и давления при статической и динамической нагрузках в процессе СКИН приведены на рис. 17. Динамическую нагрузку

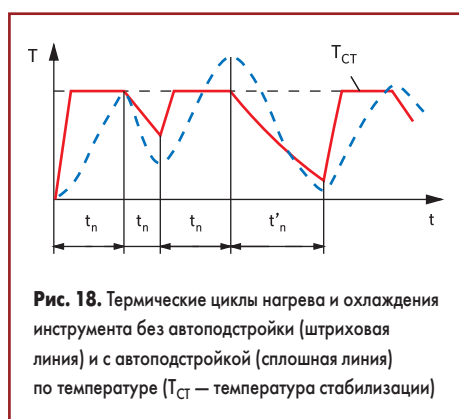


Рис. 18. Термические циклы нагрева и охлаждения инструмента без автоподстройки (штриховая линия) и с автоподстройкой (сплошная линия) по температуре (T<sub>ст</sub> — температура стабилизации)

можно создать электромагнитным механизмом сжатия.

Температура нагрева инструмента (зоны сварного контакта) является основным параметром при СКИН. Нагрев инструмента и поддержание постоянной температуры в зоне соединения при разных условиях теплоотдачи обеспечиваются применением обратной связи по температуре нагрева инструмента или зоны соединения (рис. 18).

Малые погрешности поддержания температуры нагрева (±2%) и инерционность обеспечиваются при нагреве инструмента импульсным током с частотой импульсов 0,5–1,5 кГц.

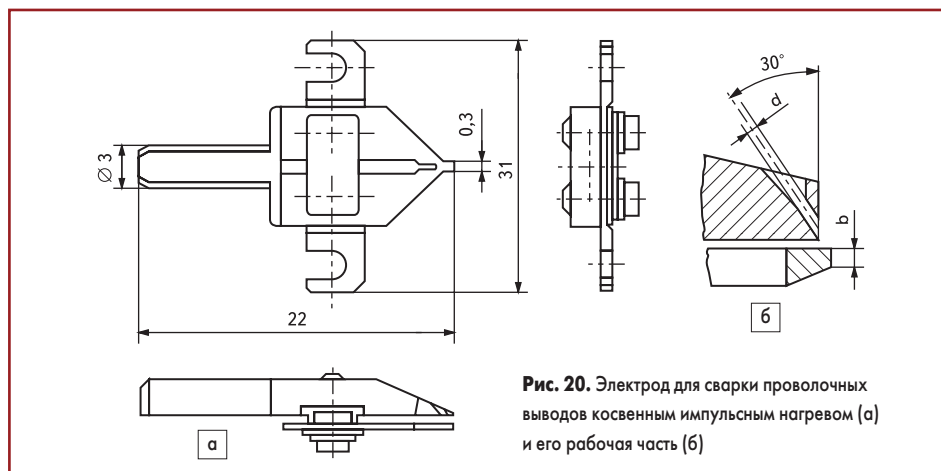


Рис. 20. Электрод для сварки проволочных выводов косвенным импульсным нагревом (а) и его рабочая часть (б)

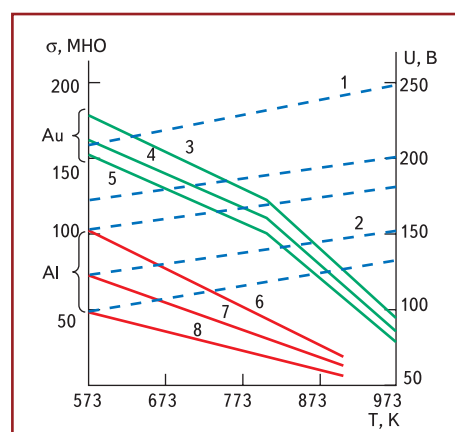


Рис. 19. Номограмма СКИН золотой и алюминиевой проволоки с алюминиевой пленкой: 1, 2 — время сварки соответственно 0,1 и 1 с; 3, 4, 5, 6, 7, 8 — диаметр соответственно 60; 50; 40; 100; 80 и 40 мкм

Размер инструмента задают таким, чтобы до необходимой температуры нагревалась только рабочая часть, которая контактирует со свариваемыми элементами.

На рис. 19 изображена номограмма режимов СКИН. При температуре сварки, превышающей температуру эвтектики «золото–кремний», следует снизить давление на проволоку (этим объясняются изломы на линиях, соответствующих золотым проволокам). Зависимости температуры инструмента от первичного напряжения и длительности импульса приводятся на номограмме в виде наклонных штриховых линий, каждая из которых соответствует определенной длительности импульса. Режимы сварки задаются максимальной температурой T<sub>0</sub> и временем сварки t<sub>с</sub>. По пересечению ординаты с линией, соответствующей диаметру выбранной проволоки, определяется давление и напряжение.

**Инструмент для СКИН**

К рабочему инструменту при СКИН предъявляют более высокие требования, чем при ТКС (рис. 20). Держатели электродов должны изготавливаться из стали 20Х13, а рабочая часть — из сплава ВК8.

Конструкция инструмента должна учитывать условия его нагрева и охлаждения и обеспечивать максимальное выделение энергии в рабочей части. Соотношение между полной энергией W<sub>э</sub>, выделяющейся в инструменте

(электроре), и энергией  $W_p$ , непосредственно выделяющейся в рабочей части, выражается через КПД инструмента ( $\eta_{II}$ ). При правильно сконструированном инструменте  $\eta_{II}$  составляет не менее 16–25%. Энергия, выделяющаяся в рабочей части инструмента, при нагреве до заданной температуры в свободном состоянии без соприкосновения со свариваемыми деталями должна быть примерно в 15 раз больше энергии, отводимой в свариваемые детали. При этом температура нагрева инструмента при сварке снижается примерно на 6% по сравнению с оптимальной, что допустимо при импульсной сварке давлением.

Другим важным параметром инструмента является длительность охлаждения рабочей части до начальной температуры. Ее можно найти через постоянную времени инструмента  $t_0$ , которая определяет минимальный интервал между отдельными сварками, а значит, и предельную производительность установки.

Инструмент в виде круглого стержня из вольфрама, заточенного на конус с диаметром торца 200 мкм и расстоянием от паза до торца 400 мкм, позволяет проводить сварку с периодичностью 1 с. Инструмент в виде V-образной пластинки из молибдена с дополнительными теплоотводами может нагреваться с периодичностью 0,5 с.

### Контактная сварка (КС)

#### Определение

Контактная сварка (КС) — сварка с применением давления, при которой используется теплота, выделяющаяся в контакте свариваемых деталей при прохождении через них электрического тока.

#### Область применения

Для достаточного прогрева зоны сварки деталей, входящих к тому же в теплоемкие узлы, обычно используют энергию электрического тока. В процессе электрической сварки давлением прогрев зоны сварки осуществляется джоулевым теплом, выделяемым электрическим током на сопротивлении этой зоны. Из электрических видов сварки термодавлением в производстве микроминиатюрных изделий наибольшее применение получила контактная микросварка.

Количество джоулевого тепла:

$$Q = I^2 R t, \text{ причем } R = R_K + R_D + R_M,$$

где  $t$  — время сварки;  $R_K$  — контактное сопротивление электродов с деталью;  $R_D$  — сопротивление току свариваемых деталей;  $R_M$  — сопротивление току между свариваемыми деталями.

КС применяется, когда недопустим общий нагрев изделия.

#### Процесс образования соединения и параметры КС

При разварке проволоочных выводов используется одна из разновидностей КС — точечная КС (сварка, при которой сварное соединение образуется между торцами электродов, передающих усилие сжатия). Именно об этой разновидности КС и пойдет речь далее.

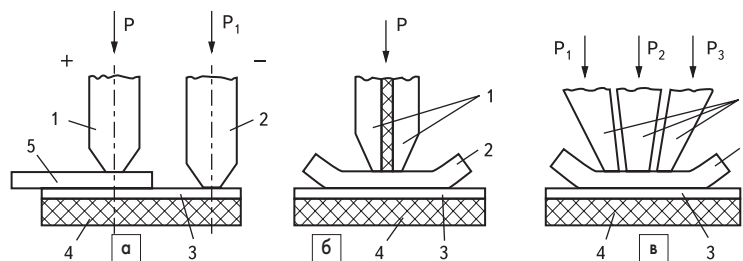


Рис. 21. Основные способы односторонней КС МС:

а) — односторонняя КС (1 — электрод для сжатия свариваемых деталей и подвода тока к проволоке; 2 — электрод для подвода тока к КП платы (подложки); 3 — КП или шина печатной платы; 4 — диэлектрическое основание; 5 — привариваемая проволока или лента); б) и в) односторонняя КС соответственно сдвоенным электродом (с параллельным зазором) и строенным электродом трехфазным током (1 — электроды; 2 — привариваемый проводник; 3 — тонкая металлическая пленка; 4 — диэлектрическая подложка)

В настоящее время для присоединения выводов к контактными площадкам кристаллов интегральных схем используются два способа КС:

- с односторонним расположением двух электродов;
- с односторонним расположением одного сдвоенного электрода.

Второй способ отличается от первого тем, что рабочие электроды выполнены в виде двух токонесущих элементов, разделенных между собой изоляционной прокладкой.

При КС электроды внешней цепи источника тока также выполняют функцию инструмента, создающего электрический контакт, как с самими деталями, так и между деталями в зоне сварки. При этом соединение происходит на участках, ограниченных площадью торцов электродов. В зависимости от величины тока и характера сдвигающего усилия электродов КС может происходить в твердой или в жидкой фазе (контактная сварка плавлением). КС обладает многообразием способов исполнения. По способу подвода сварочного тока различают одностороннюю КС, когда оба электрода расположены на одной из свариваемых деталей, и двустороннюю, когда один электрод находится на одной детали, а второй — на другой. При выполнении КС могут быть получены точечные и протяженные, в том числе замкнутые, сварки, образуемые как на плоской поверхности, так и на поверхности, имеющей специально изготовленные выступы (рельефы, пуклевки). Для КС может использоваться переменный ток промышленной или более высокой частоты, постоянный и импульсный ток.

При односторонней КС (рис. 21а) один электрод прижимает проволоку или ленту к КП, а второй электрод устанавливается рядом со свариваемой верхней деталью на КП. Этот способ применяется для сварки весьма тонких проводников (круглых и плоских) с относительно толстым материалом и для сварки проводников с электроосажденными пленками толщиной не более 20 мкм.

Для сварки навесных элементов с круглыми и плоскими выводами к тонким пленкам на хрупких подложках и к печатному монтажу применяется КС сдвоенным электродом (рис. 21б) и сварка строенным электродом

трехфазным током (рис. 21в). При односторонней сварке сдвоенным электродом электроды устанавливают на верхнюю привариваемую деталь (проволоку, ленту) и прижимают к нижней детали. При пропускании электрического тока происходит в основном разогрев верхней детали, а сварка может произойти как под электродом, так и в зазоре. В зависимости от размеров свариваемых проводников и требований, предъявляемых к соединениям, зазор между электродами может составлять от 10 мкм до 1 мм. Таким образом приваривают проводники диаметром 20÷250 мкм к разнообразным тонким пленкам.

При нагреве трехфазным током распределение тока по сечению происходит более равномерно, чем при однофазном. Это обеспечивает нагрев проводника до температуры сварки при меньшей удельной мощности импульса, что уменьшает резкий перегрев материала проводника в межэлектродных зазорах, то есть процесс сварки становится более устойчивым, чем процесс сварки сдвоенным электродом.

При односторонней КС в воспроизводимости процесса важную роль играют контактное сопротивление между электродами и проводником  $R_K$  и сопротивление проводника в зазоре между электродами, от которых зависит температура в зоне контакта  $T_K$  и в зазоре  $T_Z$ . Температура в контакте привариваемого проводника с пленкой  $T_{CB}$  достигается в основном за счет тепловыделения от этих источников тепла. Процесс сварки необходимо осуществлять так, чтобы разница между температурами  $T_K$ ,  $T_Z$  и  $T_{CB}$  была минимальной.

Для образования настоящего сварного ядра необходимо заставить ток протекать через нижний слой свариваемых деталей. Это достигается установкой зазора между электродами, который должен составлять от двух до пяти суммарных толщин выводов. Вследствие отталкивающих сил между двумя параллельно протекающими токами появляется эффект выдавливания тока в нижний слой.

Результаты свариваемости материалов при определенных сочетаниях материалов и типов размеров элементов приведены в таблице 11.

Основными параметрами КС являются:

- сварочный ток (А);
- время сварки (с);
- усилие сжатия (Н).

Таблица 11. Свариваемость материалов и типоразмеры элементов МС при односторонней КС

Материал КП и подложки	Материал проводников							Ковар золоченый, $\delta < 0,15$
	Золото $d < 0,1$	Медь без покрытия		Медь серебрянная или луженая		Никель		
		$d < (0,1+0,12); \delta < (0,08+0,1)$	$d \geq (0,1+0,12); \delta \geq (0,08+0,1)$	$d < 0,15; \delta < 0,12$	$d \geq 0,15; \delta \geq 0,12$	$d < 0,1; \delta < 0,1$	$d \geq 0,1; \delta \geq 0,1$	
Медь ( $\delta = 0,02 \div 0,05$ ) и стеклотекстолит или гетинакс	++	+	-	++	+	-	-	+
Медь луженая и стеклотекстолит	++	+	+	++	++	+	+	++
Медь серебрянная и стеклотекстолит	++	++	+	++	+	+	+	+
Никель золоченый ( $\delta = 0,05 \div 0,1$ ) и стеклотекстолит	++	++	+	++	+	+	+	+
Серебро вожженное ( $\delta = 0,055 \div 0,15$ ) и фотоситалл	++	+	-	++	-	-	-	+
Золото ( $\delta = 0,001 \div 0,02$ ) с подслоем титана на ситалле или полукоре	++	++	-	+	+	-	-	+

Примечание: ++ хорошая свариваемость; + удовлетворительная; - неудовлетворительная.  
 $\delta$  — толщина КП или проводника, мм;  $d$  — диаметр проводника, мм

Таблица 12. Оптимальные режимы сварки расщепленным электродом

Соединяемые металлы		Температура, °С	Удельное давление, МПа	Время, с	Деформация вывода, %
Проводник, диаметр, мкм	Пленка				
Au, 40	Au, Ni, Ag	400-420	40-70	0,1-0,5	50-60
Al, 40	Au, Al	450-550	15-40		60-70
Cu, 40-100	Au, Ni, Ag	520-700	60-100	0,2-1,0	50-60

**Технология КС**

При разработке технологии КС и проектировании сварных узлов, особенно узлов, отличающихся разнообразием форм, размеров, сочетаний толщин и материалов, необходимо учитывать следующие факторы:

1. При сравнительно малых усилиях сжатия и малых собственных сопротивлениях деталей возрастает роль контактных сопротивлений как основных источников теплоты. Кроме того, значительное количество теплоты может выделяться и на электрическом контакте электрода и детали.
2. При жестких режимах (короткие и мощные импульсы тока) сварки повышается чувствительность процесса к выплескам и испарению металла, а также к увеличению рассеяния показателей прочности.
3. Сильное влияние на качество сварки и выбор ее режимов оказывают такие переменные факторы, как состояние поверхности в зонах контакта деталей между собой и с электродом, диаметр электрода, усилие и длительность сжатия электродов, величина, форма и длительность тока.

4. При КС на длительном постоянном или импульсном однополярном токе необходимо учитывать полярный эффект Пельтье, который является причиной значительного смещения сварной зоны в одну из деталей, что может привести как к повышению прочности сварного соединения, так и к его снижению.

При выполнении КС необходимо учитывать следующие моменты:

- длина свободных соединительных проводников, перемычек или проволочных выводов компонентов в месте сварного соединения должна быть не менее 0,3 мм;
- величина поперечной деформации выводов компонентов соединительных проводников, перемычек в месте сварки не должна превышать  $2,5 d_{\text{пр}}$ .

При КС расщепленным электродом основными технологическими параметрами являются форма и длительность сварочного импульса, контактное усилие. Сварочный импульс должен обеспечить предварительный нагрев места соединения и плавный спад температуры после окончания сварки. Режимы односторонней КС приведены в таблице 12.

Сварочный импульс формируют, как правило, разрядом конденсатора. Так как в серийном производстве переходные сопротивления  $R_k$  и  $R_m$  постоянно колеблются, существует опасность при однажды установленном сварочном токе, что соединение или прорит, или энергии не хватит, чтобы реализовать сварку. Поэтому необходимо периодически контролировать установленный режим сварки.

**Инструмент для КС**

Для получения качественного соединения КС большое значение имеет форма и размеры электродов (рис. 22, 23, 24), к которым ввиду специфических условий предъявляется ряд эксплуатационных требований. Обычно рабочая часть наконечников электродов имеет форму усеченной пирамиды и изготавливается из высокопрочного материала на основе карбида вольфрама марки ВК-8, сплава ТН-20 или сплава ТН-40.

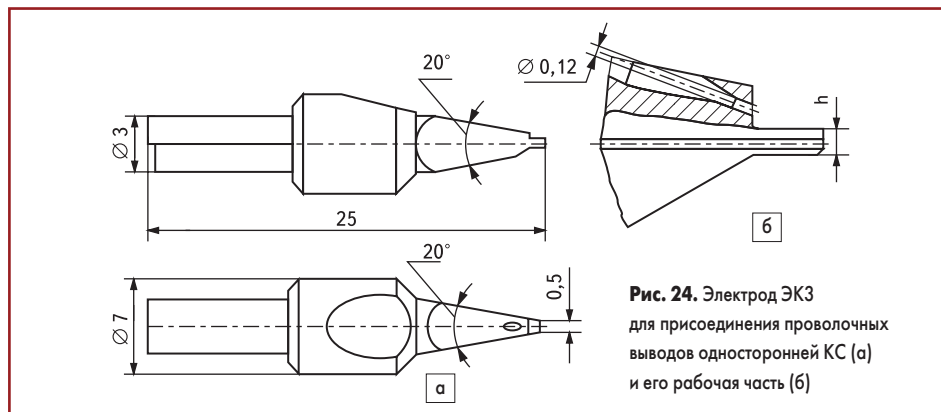


Рис. 24. Электрод ЭК3 для присоединения проволочных выводов односторонней КС (а) и его рабочая часть (б)

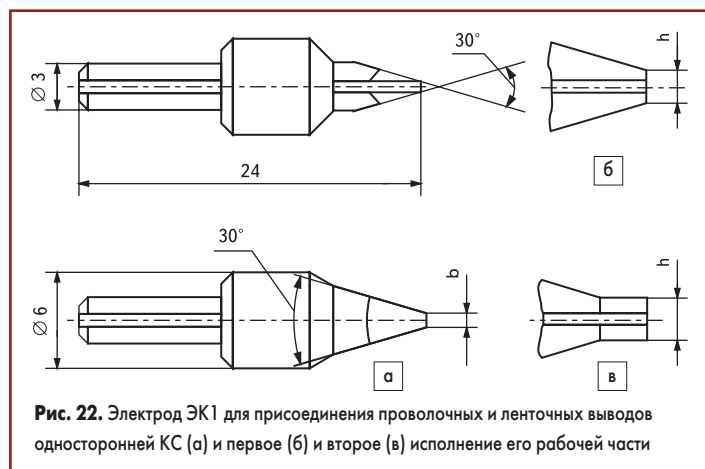


Рис. 22. Электрод ЭК1 для присоединения проволочных и ленточных выводов односторонней КС (а) и первое (б) и второе (в) исполнение его рабочей части

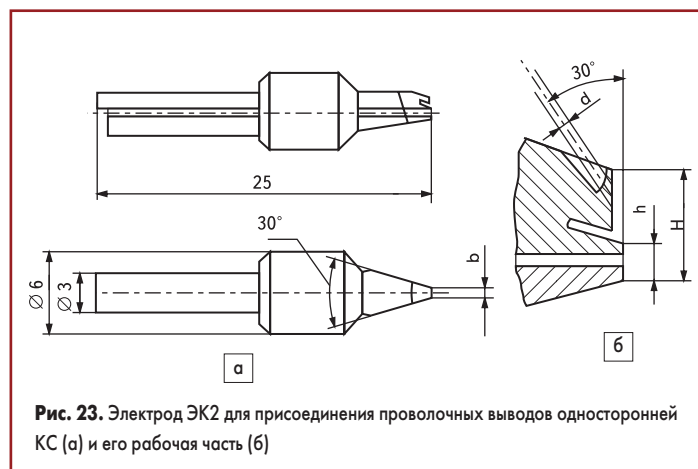


Рис. 23. Электрод ЭК2 для присоединения проволочных выводов односторонней КС (а) и его рабочая часть (б)



**Таблица 13.** Основные дефекты и причины их возникновения при присоединении выводов КС

Дефект	Причина возникновения
Прожоги сварного соединения	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Усилие сжатия инструмента больше указанного в технологической документации (ТД)</li> <li>• Время сварки больше указанного в ТД</li> <li>• Сварочный ток больше допустимого</li> <li>• Износ рабочей части инструмента</li> <li>• Загрязнение рабочей поверхности инструмента</li> </ul>
Отрыв выводов от КП подложек, плат и траверсов	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Усилие сжатия инструмента меньше указанного в ТД</li> <li>• Время сварки меньше указанного в ТД</li> <li>• Сварочный ток меньше допустимого</li> <li>• Сбои механизма подачи проволоки</li> <li>• Износ рабочей части инструмента</li> <li>• Разновысотность траверс больше допустимой нормы</li> <li>• Размеры траверс меньше указанных в конструкторской документации (КД)</li> </ul>
Пережатие сварных соединений на КП подложек, плат, траверсах	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Загрязнение оснований подложек, траверс, проволоки, инструмента</li> <li>• Усилие сжатия инструмента больше указанного в ТД</li> <li>• Время сварки больше указанного в ТД</li> <li>• Твердость проволоки меньше допустимой</li> <li>• Разновысотность траверса больше допустимой нормы</li> </ul>

При сварке выделяются пары органических веществ из диэлектрического основания монтажных подложек (печатных плат). Они конденсируются на сварочных электродах, образуя диэлектрическую пленку, поэтому электроды должны подвергаться входному контролю и соответствовать требованиям ОСТ 11 31.5001.6-85, ОСТ 11 31.5001.7-85. Рабочая поверхность сварочного инструмента должна быть без сколов, трещин и загрязнений. Кроме того, перед началом смены она контролируется под микроскопом при увеличении 56х.

### Оборудование для КС

Технологическое оборудование для присоединения выводов методом КС включает следующие основные узлы:

- рабочий столик;
- механизм создания давления на электрод;
- механизм подачи и отрезки проволоки;
- рабочий инструмент;
- механизм совмещения соединяемых элементов;
- оптическую систему визуального наблюдения процесса сварки;
- блоки питания и управления.

Рабочий столик служит для расположения на нем кристаллов или корпусов с кристаллами. Механизм создания давления на электрод позволяет прикладывать усилия 0,1–0,5 Н. Принцип действия механизма подачи и отрезки проволоки основан на движении проволоки через капиллярное отверстие и отрезании ее рычажным ножом. Оптическая визуальная система наблюдения состоит из микроскопа или проектора. Блок питания и управления позволяет задавать рабочий режим сварки и производить его перестройку и регулировку при смене типа кристалла и материала вывода.

Основные дефекты и причины их возникновения при присоединении выводов КС приведены в таблице 13.

*Окончание следует*

### Литература

1. ОСТ В 11 1010-2001. Микросхемы интегральные бескорпусные. Общие технические условия.
2. ОСТ 107.460091.004-88. Технология сборки микросборок. Общие требования.
3. ОСТ 11 073.013-83. Микросхемы интегральные. Методы испытаний. Ч. 4. (Методы визуального контроля).
4. РД 11 0274-90. Микросхемы интегральные. Технические требования к технологическим процессам сборки.
5. Ефимов И. Е., Горбунов Ю. И., Козырь И. Я. Микроэлектроника. М.: Высшая школа. 1977.
6. Сварка в машиностроении. Справочник. Т. 1. Под редакцией д. т. н. Н. А. Ольшанского. М.: Машиностроение. 1978.
7. Минскер Ф. Е. Справочник сборщика микросхем. М.: Высшая школа. 1992.
8. Жиров Г. А. Технология гибридных интегральных микросхем. Киев.: Вища школа. 1977.
9. Борисенко А. С., Бавыкин Н. И. Технология и оборудование для производства микроэлектронных устройств. М.: Машиностроение. 1983.
10. Парфенов О. Д. Технология микросхем. М.: Высшая школа. 1977.
11. Малышева И. А. Технология производства интегральных микросхем. М.: Радио и связь. 1991.
12. Малащенко А., Вайнштейн В. Машины для контактной микросварки, пайки и термообработки // Компоненты и технологии. 2004. № 9.
13. Кларк Р. Перевод: Сержанов Ю. В. AN-1061. Кристалл: установка и сварка. Руководство для организации процесса сборки.