



# Технологическое обеспечение надежности соединений в печатных платах

**Сочетание больших деформаций металлизации отверстий при температурных нагрузках и уменьшение пластичности меди может при определенных условиях приводить к разрыву металлизации или ее сдвигу относительно стенок отверстий, если не принять мер для увеличения пластичности гальванических осадков при температурах, соответствующих возможному нагреву плат.**

**Аркадий Медведев,**  
профессор МАИ

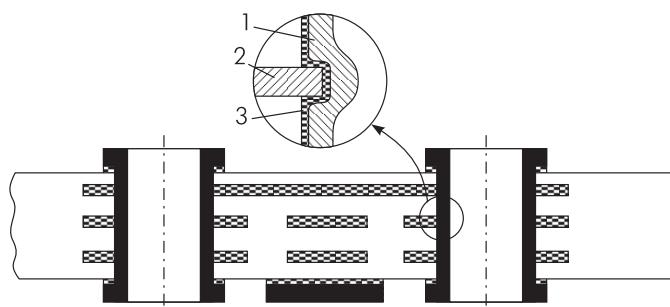
medvedevam@bk.ru

## Элементы структуры электрических межсоединений

Структуры межсоединений имеют большое разнообразие, но наиболее характерное сочетание элементов соединений содержат многослойные печатные платы (МПП), изготавливаемые методом металлизации сквозных отверстий. Их можно разделить по конструктивным признакам, физико-механическим характеристикам и возможностям контроля на три основные группы (рис. 1): печатные проводники и проводящие плоскости, осуществляющие продольные соединения в слоях в направлениях X-Y; металлизация отверстий, выполняющая поперечные (трансверсальные) соединения печатных проводников в разных слоях в направлении Z; внутренние соединения печатных проводников с металлизацией отверстий (соединения продольной и поперечной структур).

Сопоставления сечений элементов соединений показывают, что наиболее слабым по сечению звеном является печатный проводник. Площадь сечения металлизации отверстий и внутреннего соединения почти в 10 раз больше площади сечения печатного проводника. Такое сопоставление может

создать впечатление, что наиболее вероятным источником отказов соединений должен являться печатный проводник. Однако практика эксплуатации электронных устройств показывает, что подавляющая часть отказов приходится на металлизацию отверстий и внутренние соединения. Это объясняется, в частности, наличием в процессе производства случайных источников ухудшения физико-механических характеристик химического и гальванического осадков меди. Напряжения, возникающие в гальванических осадках, создают предпосылки для образования кольцевых трещин и вызывают тем самым отказ внутренних соединений. Во время пайки ПП кольцевые трещины являются препятствием на пути потока припоя и ухудшают теплопередачу вдоль стенок отверстий. Это нарушает температурные условия пайки, что может явиться причиной образования «холодных» спаев или непропаев отверстий. После монтажа температурная усадка припоя в отверстиях может привести к отрыву металлизации от стенок отверстий и торцов внутренних контактных площадок, если очистка отверстий после сверления или химически осажденная медь на стенках отверстий не отвечает определенным требованиям. Наиболее опасными дефектами металлизации отверстий и внутренних соединений являются недопустимо малая толщина металлизации, локальное отсутствие меди в отверстиях, кольцевые трещины в металлизации отверстий, отслоение металлизации от стенок отверстий, неполное контактирование металлизации с контактными площадками внутренних слоев, недоброкачественный по физико-механическим свойствам осадок меди, недопустимо большое смещение рисунка слоев относительно центров сверления отверстий под металлизацию, грубые наросты меди в отверстиях, неудовлетворительное состояние диэлектрика в зоне металлизации. Следует иметь в виду, что не каждый из названных дефектов, взятый в отдельности, может вызвать нарушение работоспособности ПП. Чаще к отказам приводит сочетание нескольких дефектов, суммарное действие кото-



**Рис. 1.** Элементы структуры соединений в МПП:

- 1 — гальванически осажденная медь — поперечное соединение;
- 2 — контактная площадка, переходящая в проводник, — продольное соединение в плоскости МПП;
- 3 — внутреннее соединение металлизации отверстия с контактной площадкой внутреннего слоя

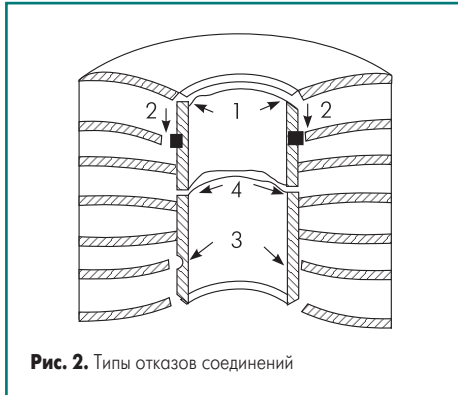


Рис. 2. Типы отказов соединений

рых постепенно приводит к ослаблению соединений и последующему отказу.

Большая часть перечисленных дефектов межслойных соединений выявляется методом неразрушающего и разрушающего контроля: условие совмещения слоев должно обеспечиваться размером контактных площадок, конструктивный расчет которых должен выполняться с учетом производственных погрешностей. Обязателен в производстве МПП контроль позиционных точностей на всех операциях технологического процесса, ответственных за надежность совмещения элементов соединений. Повсеместно должен использоваться металлографический анализ шлифов сечений отверстий печатных плат.

**Модель отказов соединений**

Печатная плата представляет собой сложную композиционную систему, содержащую разнородные материалы: медь, стекло, полимер (например, эпоксидную смолу). Они имеют значительно различающиеся термические коэффициенты линейного расширения (ТКЛР). Особенно большую и меняющуюся от температуры величину ТКЛР в этой композиции имеют полимеры, используемые в качестве связующего стеклопластика. Именно поэтому для улучшения размерной стабильности полимеры армируют волокном. Однако этим приемом уменьшают ТКЛР только вдоль волокон стеклоткани, то есть вдоль плоскости листов материала. В направлении, перпендикулярном плоскости армирования, ТКЛР остается сравнительно большим (табл. 1).

Известно, что именно из-за этих различий ТКЛР при температурах оплавления, пайки и перепайки, а также при больших изменениях температур в процессе эксплуатации в элементах соединений ПП возникают значительные термомеханические напряжения, которые могут привести к отказам соединений

Таблица 1. Значения ТКЛР основных материалов ПП

	$\alpha \times 10^6$
Эпоксидная смола	600
Эпоксидная смола, армированная стеклотканью:	
в плоскости листа	~20
в трансверсальном направлении:	
при $T < T_g$	100
при $T > T_g$	400
Медь	17

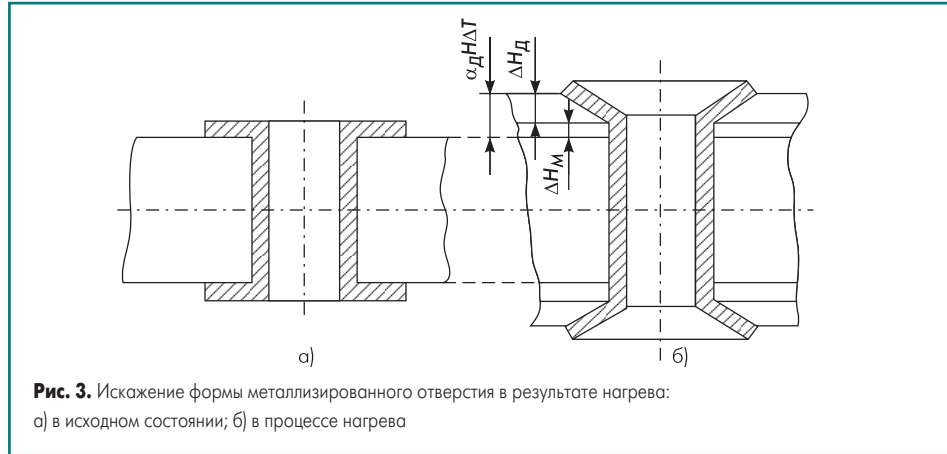


Рис. 3. Искажение формы металлизированного отверстия в результате нагрева: а) в исходном состоянии; б) в процессе нагрева

(рис. 2) в результате кольцевого разрыва по внутреннему диаметру контактной площадки наружного слоя (тип 1), разрыва внутреннего соединения (тип 2), сдвига металлизации относительно стенок отверстия с разрушением внутренних соединений (тип 3), кольцевого разрыва металлизации (тип 4).

Термомеханические напряжения приводят к растяжению металлизации вдоль оси отверстия (осевые напряжения) и изгибу контактных площадок, наибольшая концентрация которого сосредоточивается на стыке с металлическим цилиндром отверстия (напряжение изгиба). Типичное искажение формы отверстия при нагреве показано на рис. 3.

Анализ осевых термомеханических напряжений, возникающих в металлизации отверстий, можно свести к задаче с двумя стержнями, скрепленными по торцам и имеющими в исходном состоянии длину  $L$ . На рис. 4 стержень  $D$  изображает диэлектрик с жесткостью  $J_D$  и ТКЛР  $\alpha_D$ , стержень  $M$  — медь с характеристиками  $J_M$  и  $\alpha_M$ . Если бы стержни не были скреплены по торцам, при изменении температуры на  $\Delta T$  каждый из них свободно расширяться бы в соответствии со своим ТКЛР. Но поскольку они скреплены, удлинившийся в большей мере стержень диэлектрика должен быть сжат, а медный растянут усилием  $F$ :

$$F = \frac{(\alpha_M - \alpha_D)\Delta T J_M}{1 + J_M/J_D},$$

где  $J_M$  и  $J_D$  — условные жесткости меди и диэлектрика. Можно показать, что возникающая под действием этого усилия деформация меди равна

$$\epsilon_M = \frac{(\alpha_D - \alpha_M)\Delta T}{1 + J_M/J_D}$$

Если  $\epsilon_M$  превышает предел прочности медного осадка в отверстии, наступает отказ 4-го типа — кольцевой разрыв металлизации.

Модель напряжений на стыке металлизации отверстия с внутренним кольцом контактной площадки можно интерпретировать добавлением к предыдущей модели вращающегося элемента, представляющего собой контактную площадку (рис. 5), края которой поднимаются, отрываясь от диэлектрика. Напряжение изгиба, концентрирующееся по внутреннему кольцу контактной площадке, тем больше, чем больше угол изгиба  $\theta$ :

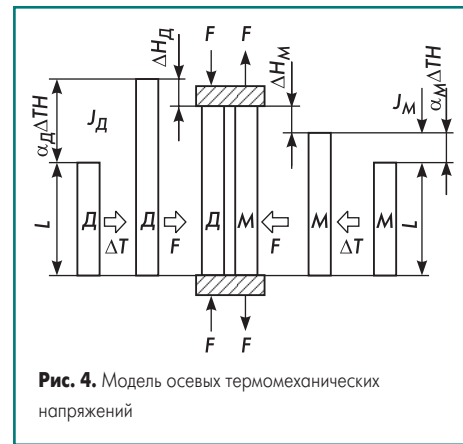


Рис. 4. Модель осевых термомеханических напряжений

$$\theta = \arctg\left(\frac{2H[(\alpha_D - \alpha_M)\Delta T - \epsilon_M]}{D - d}\right).$$

Если силы сцепления металлизации со стенками отверстия малы, напряжения сдвига могут реализоваться в разрыве внутреннего соединения (отказ 3-го типа показан на рис. 6). Напряжение сдвига, очевидно, должно увеличиваться по мере увеличения расстояния стыка от нейтральной оси 0-0. Расстояние сдвига, если бы он произошел:

$$\Delta H_Z = H_Z(\alpha_D - \alpha_M)\Delta T.$$

Но если силы сцепления удерживают металлизацию на стыках отверстия, то развивающееся при повышении температуры напряжение сдвига составляет

$$\sigma_{сдв} = G(\alpha_D - \Delta_M)\Delta T.$$

Значение разрушающего напряжения сдвига определяют усилием вырыва металлизации из отверстия, отнесенным к площади стенки. Вырыв осуществляют после впаивания в отверстие проволоки соответствующей

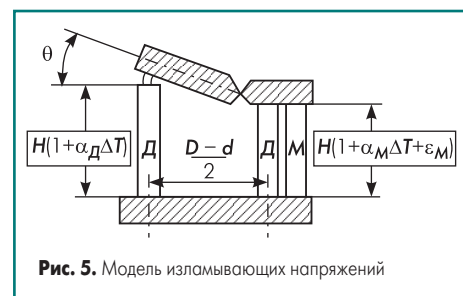


Рис. 5. Модель изламывающих напряжений

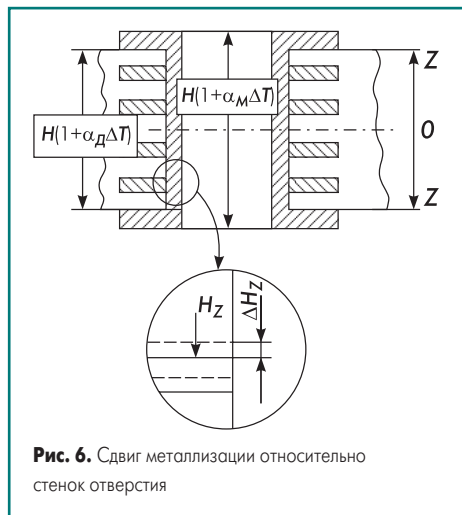


Рис. 6. Сдвиг металлизации относительно стенок отверстия

шего диаметра. Чтобы определить усилие вырыва при температурах, превышающих температуру плавления оловянно-свинцового припоя, впаивание провода в отверстие выполняют с помощью галиевых припоев, твердеющих при температурах ~50 °С. После затвердевания, которое длится около 1 ч, такое паяное соединение может работать при температурах до 800 °С.

Если диэлектрик не имеет армирующего наполнителя или наполнитель слабо армирует связующее, ТКЛР вдоль плоскости листа материала может оказаться настолько значительным, что приведет к разрыву проводников внутренних соединений (отказ типа 2). Чтобы избежать таких отказов, в производстве МПП используют армированные стеклотканью полимеры, либо материалы с низким ТКЛР, такие как полиимиды, триазины и др.

Характеристики прочности медных гальванических осадков чрезвычайно чувствительны к загрязнениям (рис. 7). Чистые осадки слабо меняют свои характеристики от температуры. Загрязнения органическими примесями не только снижают эластичность меди, но и уменьшают ее прочность при температурах пайки.

На рис. 8 показаны результаты непосредственных измерений деформации металлизированных отверстий при нагреве, охлаждении, повторном нагреве и охлаждении. Из графика нагрева видно, что разгрузка медного цилиндра начинается при температуре стеклования, а повторное нагружение наступает в диапазоне 140–160 °С. Охлаждение и повторные циклы нагрев — охлажде-

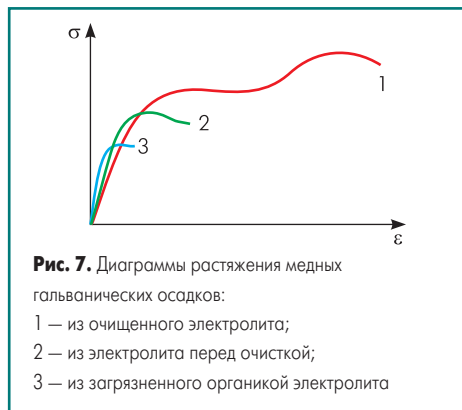


Рис. 7. Диаграммы растяжения медных гальванических осадков:

- 1 — из очищенного электролита;
- 2 — из электролита перед очисткой;
- 3 — из загрязненного органикой электролита

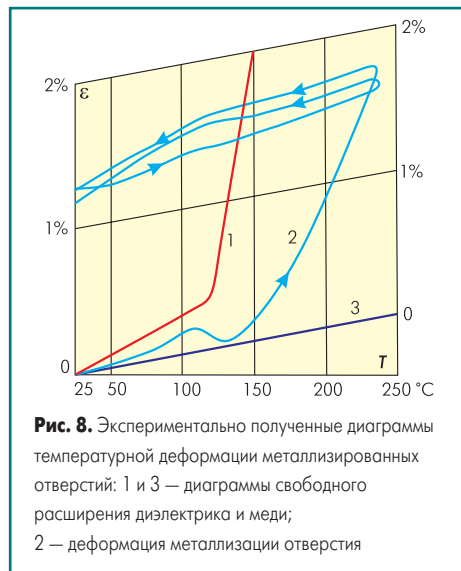


Рис. 8. Экспериментально полученные диаграммы температурной деформации металлизированных отверстий: 1 и 3 — диаграммы свободного расширения диэлектрика и меди; 2 — деформация металлизации отверстия

ние при пайках характеризуются меньшими деформациями металлизированных отверстий. Гистерезис в температурной диаграмме свидетельствует об определенной доле пластической деформации меди.

На рис. 9 показаны полученные экспериментально диаграммы изгиба контактных площадок в результате интенсивного расширения диэлектрика вдоль оси металлизированного отверстия. Можно заметить, что значительный изгиб контактные площадки получают только при температурах выше температуры стеклования, то есть при температурах пайки. Очевидно, что угол изгиба будет тем больше, чем дальше контактная площадка от нейтральной линии, находящейся по центру толщины платы, и чем больше толщина ПП.

На вероятности разрушения межсоединений серьезно сказывается отношение глубины отверстия к его диаметру. Тонкие отверстия слабее по сечению, и поэтому они больше подвержены деформации, они ближе к разрыву при температурных нагрузках, если не обеспечить хорошую пластичность. В таблице 2 приведены пороговые значения температур разрушения межсоединений в МПП.

#### Управление реологическими свойствами медного гальванопокрытия

Медь имеет большую пластичность с удлинением до 20%, высокую механическую прочность и среднюю твердость  $HV_{0,02} \approx 100 \text{ кгс/мм}^2$  (1 ГПа). Для того чтобы достичь таких свойств для металлизации отверстий, необходимы мелкокристаллическая структура, хорошее макро- и микросглаживание слоя. Решающее влияние на характер структуры и механические свойства осажденной меди оказывают соосажденные органи-

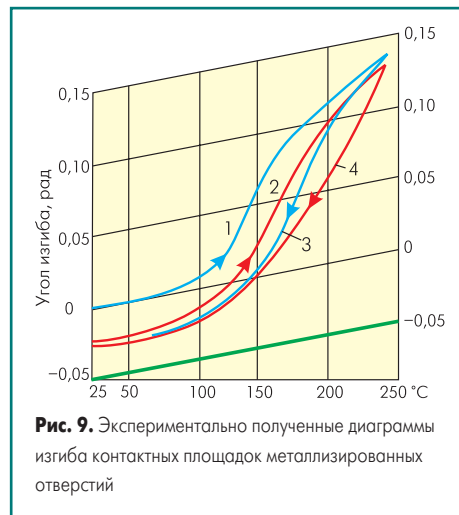


Рис. 9. Экспериментально полученные диаграммы изгиба контактных площадок металлизированных отверстий

ческие и неорганические посторонние вещества и газы, которые, внедряясь в межкристаллитные пространства, снижают сцепление слоя по границам зерен и повышают хрупкость. Постоянный контакт электролитов с поверхностями полимеров служит причиной его загрязнений органическими примесями. Основные их источники — выщелачивание органического резиста и облицовки ванны, попадания масла из воздушной магистрали при барботаже, разложившиеся органические присадки и добавки. Обработки активированным углем и фильтрация устраняют эти загрязнения. Очень важно поддерживать состав электролита: например, уменьшение содержания ионов металла и (или) концентрации кислоты уменьшает электропроводность, что вызывает увеличение напряжения на электродах, перегрев ванны, многочисленные проколы резиста, подгар покрытия, хрупкость гальванопокрытия.

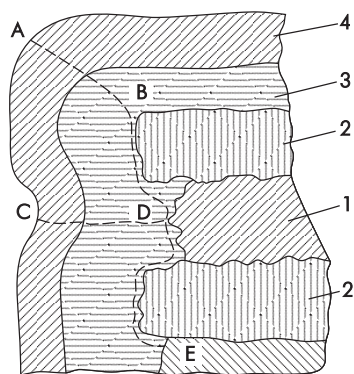
Сернокислые электролиты при хорошей очистке способны создавать гальванопокрытия с пластичностью 22–26%. Борфтористоводородные электролиты в силу особых свойств своих компонентов быстро загрязняются органическими примесями, выщелачивая резисты и футеровку ванны. Поэтому, несмотря на известные преимущества перед сернокислыми электролитами по производительности осаждения в технологии МПП, он используется редко из-за необходимости частой остановки процесса для чистки ванны.

На рис. 10 показаны линии трещин, возникающих при пайке из-за недостаточной пластичности меди.

Для обеспечения высокой надежности сквозных металлизированных отверстий достаточно иметь минимальную разрывную прочность 350 МПа (35 кгс/мм<sup>2</sup>) и минимальную пластичность 6%. Разнообразие методов измерения пластичности тонких пленок приводит к широкому диапазону результа-

Таблица 2. Пороговые температуры разрушения металлизации отверстий различного диаметра

Отношение толщины ПП к диаметру отверстия:	2:1	3:1	5:1	10:1	20:1
Пластичность, %	Пороговая температура, °С				
4	290	250	220	210	190
6	320	290	260	240	220
8	360	350	320	280	260



**Рис. 10.** Образование трещин при недостаточной пластичности меди:  
1 — диэлектрическое основание слоя (межслойная изоляция);  
2 — медная фольга (контактная площадка слоя);  
3 — медное гальванопокрытие (металлизация отверстия);  
4 — гальванопокрытие оловом-свинцом (металлорезист); AB — диагональная трещина, возникающая в момент контакта припоя с наружной контактной площадкой;  
CD — поперечная трещина, возникающая при подъеме припоя в отверстие;  
ABD — продольная трещина, проходящая по слабому слою химически осажденной меди, соединяющая две трещины AB и CD и способная вызвать дальнейший отрыв покрытия в отверстии по линии DE

тов. В связи с этим исследователи идут на всевозможные экспериментальные усложнения, чтобы получать однозначные результаты с высокой степенью повторяемости.

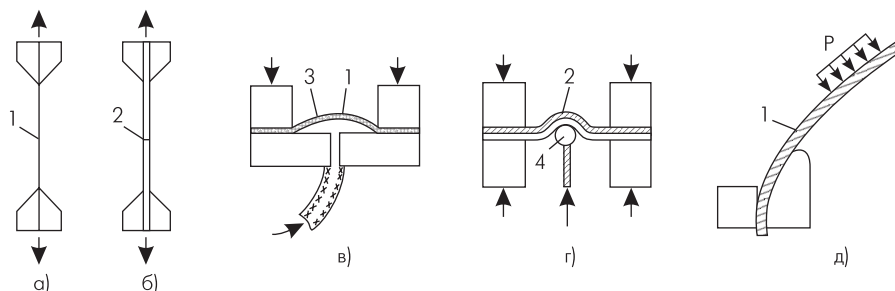
На рис. 11 показаны варианты таких испытаний, нашедших применение в практике экспериментов. Однако в производственной практике целесообразно испытывать отделенную от подложки пленку гальванопокрытия, используя для этого обычную разрывную машину (рис. 11).

Из существующих способов регистрации пластической деформации, показанных на рис. 12, наиболее удобным признан метод, по которому на образцах заранее нанесенными рисками обозначают базу  $L$ , в процессе растяжения следят за появлением на образце сетки трещин (предвестников разрыва) и при их появлении сбрасывают давление (рис. 12а).

Геометрия образца и режимы подготовки и испытаний пленки оказывают значительное влияние на результаты измерений пластичности. Наиболее стабильные результаты измерения пластичности получаются при скорости растяжения 50–100 мм/мин. Термообработка пленок перед испытаниями ускоряет процессы рекристаллизации меди и тем самым, казалось бы, способствует получению стабильных результатов. Но при этом достоверность результатов вызывает сомнения.

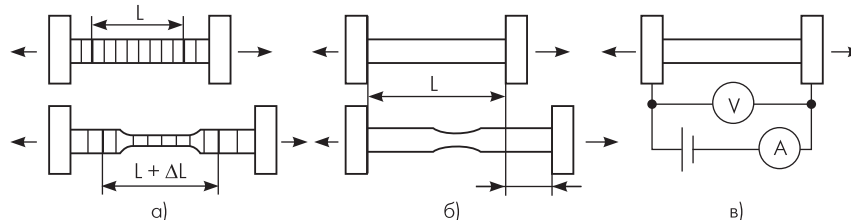
Анализ зависимости результатов измерения пластичности пленок от геометрии образца и режимов испытаний позволяет рекомендовать следующие условия получения устойчивых результатов:

- ширина базы  $12 \pm 0,05$  мм;
- длина базы  $50 + 0,25$  мм;



**Рис. 11.** Способы нагружения пленок гальванопокрытия при контроле пластичности:

- а) растяжение отделенной от подложки пленки гальванического осадка;
- б) растяжение пленки гальванопокрытия на подложке;
- в) растяжение вспучиванием; г) растяжение продавливанием шарика;
- д) испытание на перегибы: 1 — пленка гальванопокрытия; 2 — пленка гальванопокрытия на подложке; 3 — вода под давлением; 4 — стальной шарик



**Рис. 12.** Способы измерения пластичности при растяжении пленок:

- а) по изменению расстояния между заранее нанесенными рисками;
- б) по изменению расстояния между захватами разрывной машины;
- в) по изменению сопротивления растягиваемой пленки

- толщина пленки  $50 \pm 5$  мкм (идентично осаждению на поверхности);
- скорость растяжения 50–80 мм/мин;
- режимы термообработки — 2 ч при  $120^\circ\text{C}$  на воздухе или 5 мин при  $230^\circ\text{C}$  в масле.

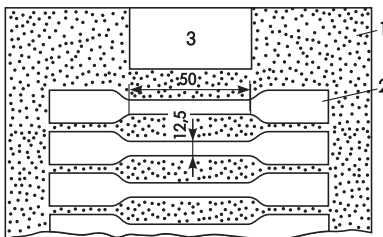
Пластина для изготовления тест-образцов пленок показана на рис. 13. В качестве материала используют нержавеющую сталь, поверхность которой сначала полируют, затем придают ей матовую поверхность, чтобы получить необходимую плотность центров кристаллизации на первой стадии гальванического наращивания (для получения мелкокристаллического осадка). И в то же время необходимо обеспечить отделение пленки после завершения процесса наращивания. Очень важно при наращивании пленок тест-образцов полностью воспроизвести режимы осаждения, принятые для рабочих плат. Чет-

кое соблюдение указанных рекомендаций позволяет поддерживать ванны гальванического меднения в состоянии, обеспечивающем качественную металлизацию отверстий.

Особенно чувствительна металлизация отверстий к воздействию высоких температур пайки бессвинцовыми припоями.

### Заключение

Надежность печатных плат во многом определяется пластичностью металлизации отверстий. Поэтому управление пластичностью медных осадков — важный фактор технологического обеспечения надежности межсоединений. Все затраты, направленные на поддержание процессов металлизации, оправдывают себя не только за счет снижения брака на конечных стадиях производства, но и создают гарантии долговременной работоспособности электронных изделий.



**Рис. 13.** Пластина для изготовления тест-образцов для измерения пластичности гальванопокрытий:

- 1 — фоторезист;
- 2 — орошенная металлическая поверхность для осаждения пленки гальванопокрытия;
- 3 — металлическая поверхность для присоединения к катодной штанге



**Рис. 14.** Металлизация отверстия, разрушенная пайкой бессвинцовым припоем. Пластичность меди 4%