

# Введение в теорию прочности паяных соединений

Настоящей статьей автор в известной мере выполняет давнюю просьбу выдающегося отечественного специалиста по пайке, лауреата Сталинской и Государственных премий С. Н. Лоцманова — «когда-нибудь заняться проблемой прочности паяных соединений...»

Александр Парфенов,  
к. т. н.

В самом деле, проблема прочности паяных соединений настолько сложна, что для ее решения необходимо учитывать не только свойства паяемых и присадочных материалов, но и весь комплекс физико-химических и конструктивно-технологических факторов, отвечающих за формирование паяных соединений. И хотя в данной статье мы будем говорить о прочности соединений в электронике, выполненных низкотемпературной пайкой, для которой прочность припоев существенно ниже прочности соединяемых материалов, это совершенно не исключает необходимости знания определенных теоретических основ и представлений о соотношениях действующих напряжений, различиях видов и характера разрушений.

Итак, при любых видах нагружения материалы испытывают два вида напряжений: нормальные (растягивающие или сжимающие) и касательные (тангенциальные). При осевом растяжении стержня металла или припоя произвольной длины силой  $P$  нормальные растягивающие напряжения перпендикулярны поперечному сечению стержня и равны  $\sigma = P/F$ , а максимальные касательные напряжения направлены под углом  $45^\circ$  к оси растяжения и равны половине нормальных напряжений —  $\tau = 0,5\sigma$ . При анализе паяных соединений относительные величины напряжений и их направления могут существенно отличаться от данного случая простого растяжения стержня, тем не менее, последний нам необходим для понимания собственно механизма разрушения.

В соответствии с этими двумя видами напряжений существуют и два макроотличных типа разрушения: разрушение путем отрыва от действия максимальных нормальных напряжений и разрушение путем среза от максимальных касательных напряжений. Мысль о двух типах разрушения (вязком и хрупком) была высказана в 1936 году Н. Н. Давиденковым в книге «Динамические испытания металлов». Дальнейшее же развитие этих взглядов принадлежит Я. Б. Фридману [1, 2].

Этим двум типам разрушения соответствуют и две характеристики прочности: максимальное сопротивление металла нормальным растягивающим напряжениям, называемое сопротивлением отрыву, и максимальное сопротивление металла касательным напряжениям, называемое сопротивлением срезу. В зависимости от соотношений сопротивления от-

рыву, срезу и предела текучести можно наблюдать три принципиально отличных случая разрушения 1–3 (рис. 1) по Я. Б. Фридману, которые следует дополнить случаем 4 (рис. 1), характерным лишь для паяных соединений, в которых на границе раздела могут образовываться хрупкие интерметаллидные соединения, или в случае, если припой и паяемый металл образуют диаграмму состояния с исчезающе малой растворимостью.

- **Случай 1.** Сопротивление отрыву лежит выше сопротивления срезу. Металл разрушается вязко от касательных напряжений с предварительной пластической деформацией.
- **Случай 2.** Сопротивление отрыву ниже сопротивления срезу, но выше предела текучести. Разрушение происходит путем отрыва с весьма малой пластической деформацией.
- **Случай 3.** Сопротивление отрыву ниже сопротивления срезу и предела текучести. Разрушение имеет хрупкий характер без предварительной пластической деформации.
- **Случай 4.** Сопротивление отрыву припоя выше его сопротивления срезу, а сопротивление срезу ниже предела текучести. Действие касательных напряжений аналогично неким скальвающим напряжениям, при которых паяное соединение разрушается (или отслаивается) исключительно хрупко при действии минимальных нагрузок.

Вопросы жидкометаллической хрупкости (эффект Ребиндера) в данной статье рассматриваться не будут, хотя известно хрупкое разрушение латуни и бронзы в контакте с расплавленными баббитами, оловянно-свинцовыми припоями и особенно в контакте с оловом [3], что объясняется кинетическими аспектами химической реакции расплава с поверхностью. Дело в том, что зарождение плоскости базиса гексагональной структуры никельарсенида (например  $Cu_6Sn_5$ ) на ступенях Франка-Кабреры медной поверхности путем «неполного испарения» по Френкелю осуществляется за счет ликвидации плотноупакованного слоя с образованием дефекта упаковки вычитания или смешанной дислокации Рида. Диффузионная подвижность в псевдоструктуре химического соединения вызывает «отрицательное переползание», или прорастание экстраплоскости дислокации Рида вглубь металла до трещины гриффитского размера [4].

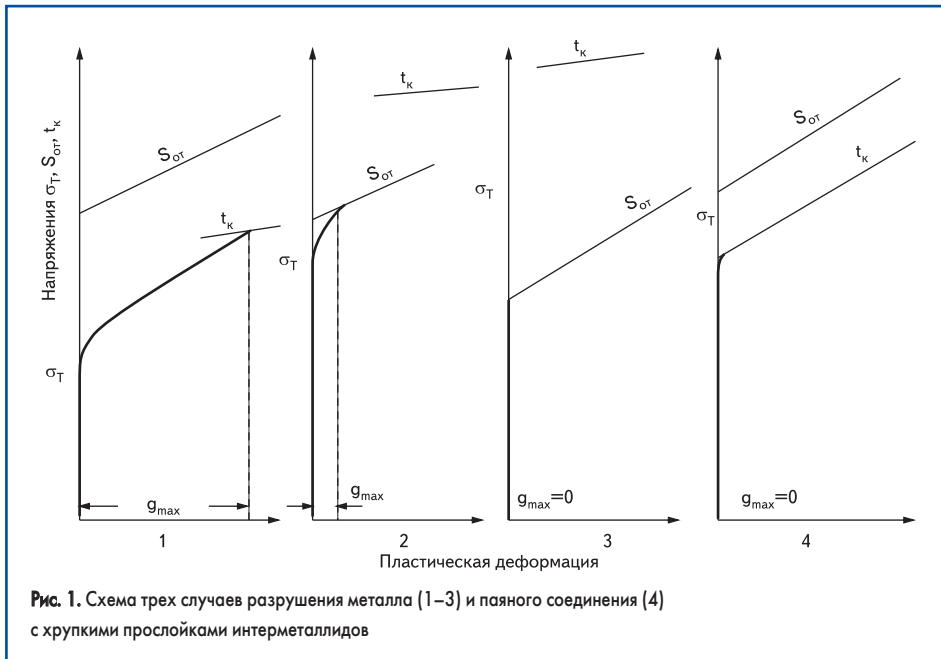


Рис. 1. Схема трех случаев разрушения металла (1–3) и паяного соединения (4) с хрупкими прослойками интерметаллидов

В конечном счете, прочность паяного соединения определяется сопротивлением к воздействию силового поля его слабого звена. Таким слабым звеном могут являться в первую очередь дефекты формирования паяного соединения и его поверхности, непропаи (частичное или полное незаполнение зазора припоем), неспаи (местное или общее отсутствие смачивания и сцепления припоя с металлом), общая или локальная эрозия (растворение, проплавление, подрезы) основного металла, а также структурно-чувствительные дефекты — газопористость, кристаллизационные, релаксационные и термические трещины, прослойки хрупких химических соединений, флюсовые и шлаковые включения. Что касается диффузионной пористости, в качестве которой некоторые авторы приводят фотографии газовых пор огромного размера, надо пояснить, что диффузионная пористость по Киркендалю носит рассеянный и субмикроскопический характер (см., например:

Уманский Я. М. «Физическое металловедение») и никогда в расплаве при низкотемпературной пайке не возникает.

Напротив, имеет место обратное явление — эффект Френкеля, при котором избыточные вакансии Киркендаля поглощаются дефектами структуры зарождения химических соединений и упомянутыми выше дислокациями Рида, что приводит к опасности появления жидкометаллической хрупкости.

Помимо указанных факторов, прочность паяных соединений определяется их типом. Наиболее распространены соединения двух типов: нахлесточные и стыковые, а остальные являются их комбинациями. Поэтому основным принципом конструирования является обеспечение равнопрочности соединения:

$$\sigma_B \times F = \tau_{\text{ср.пс}} \times F_{\text{пс}}$$

или

$$b \times h \times \sigma_B = \ell_n \times b \times \tau_{\text{ср.пс}}, \quad (1)$$

где  $F$  и  $F_{\text{пс}}$  — площади сечения образца и паяного соединения,  $\tau_{\text{ср.пс}}$  — предел прочности паяного соединения на срез,  $b$  — ширина образца;  $h$  — толщина образца;  $\ell_n$  — длина нахлестки.

$$\ell_n = h \times (\sigma_B / \tau_{\text{ср.пс}}) \cong (2 \div 5) \times h. \quad (2)$$

Низкотемпературные припои по прочности существенно уступают прочности соединяемых металлов. Наиболее слабым звеном является сам шов или его реакционная зона. Тем не менее, как мы увидим далее, увеличение длины нахлестки более 5 (формула 2) нецелесообразно, поскольку вся нагрузка воспринимается периферийными участками шва и с увеличением  $\ell_n$  возрастает число внутренних дефектов. Собственные механические свойства припоев, полученные при испытании стандартных литых образцов, могут быть использованы для нижней оценки прочности паяного соединения и верхней оценки деформационного ресурса шва. Испытания таких образцов производят по ГОСТ 1497-84, 11150-75, 9652-84, 22706-77, 3565-80 (табл. 1). Прочность паяных соединений отлична от прочности литых припоев и определяется на стандартных образцах по ГОСТ 23047-78, 23046-78, 24167-80.

Прочность оловянно-свинцовых припоев имеет максимум при эвтектическом составе (рис. 2), а прочность чистого олова или свинца намного ниже прочности припоев. Прочность пластинчатых образцов (ПОИНКС) в пять раз ниже прочности цилиндрических, поскольку толщина пластины соизмерима с размером зерна и разрушение по межзеренной границе происходит без значительных усилий. Это свидетельствует о том, что для получения сопоставимых результатов необходимо соблюдать принцип подобия испытаний. Важнейшим конструктивно-технологическим параметром паяных соединений является величина зазора. Зазор должен обеспечивать необходимые условия затекания флюса и припоя, а также свободного удаления шлаков и продуктов раскисления. Лучшие характеристики соединений, выполненных оловянно-свинцовыми припоями, достигаются

Таблица 1. Механические характеристики припоев

Припой	$T_{\text{мр}}, ^\circ\text{C}$	$\sigma_B, \text{МПа}$	$\tau_{\text{ср}}, \text{МПа}$	$\delta, \%$	$\Psi, \%$	$E, \text{ГПа}$	$G, \text{ГПа}$
ПОИНКС <sup>1</sup>	105	23,9	—	32	80	3	1,2
ПОИНКС <sup>2</sup>	105	6	—	150	96	3	1,2
ПОСК 50–18	145	39,3	—	40	—	—	—
ПОС–61 <sup>1</sup>	190	47	34	46	75	12	4,6
ПОС–40	238	37,2	38	52	—	—	—
ПОССу	216	37,2	—	62	—	—	—
Sn <sup>1</sup>	232	25,5	20	52	—	46	18
Pb <sup>1</sup>	327	13	13	35	—	16	8
ПСр45	725	370	—	10	3,3	—	—
ПСр70	755	310	—	30,5	18,3	—	—
ПСр25	775	365	—	8	4	—	—
Ag	960,5	392	—	2	—	83	30
Си	1083	176	—	20	—	82	31
ПОИНКС <sup>2</sup>	105	28	—	28	—	11,6	—
ПОС–61 <sup>1</sup>	190	50	—	32	—	39,7	—

Примечание. Состав припоя ПОИНКС, %: Sn-41, In-49, Cd-7, Pb-3;

<sup>1</sup> — цилиндрические образцы диаметром 6 мм с длиной рабочей части 30 мм;

<sup>2</sup> — образцы в виде пластин размером 90×10×1 мм;

<sup>3</sup> — конструктивные механические характеристики;

<sup>1...3</sup> — данные из пяти образцов, поле рассеяния не превышает ±15%.

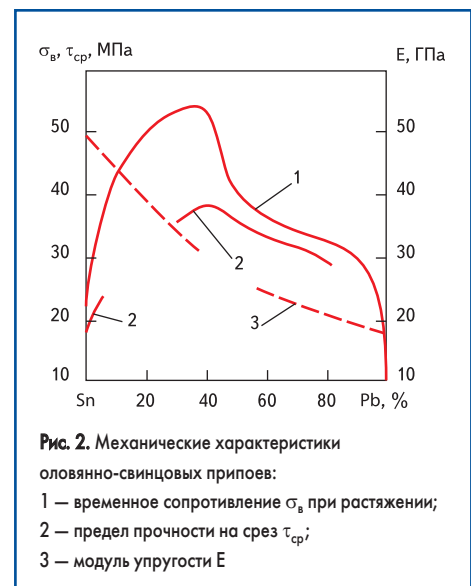
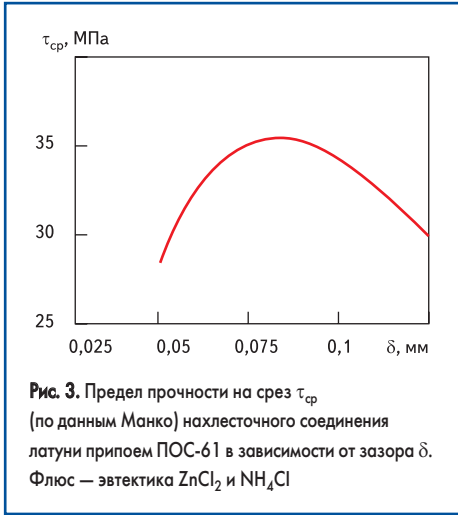


Рис. 2. Механические характеристики оловянно-свинцовых припоев:

1 — временное сопротивление  $\sigma_B$  при растяжении;

2 — предел прочности на срез  $\tau_{\text{ср}}$ ;

3 — модуль упругости  $E$



при зазорах 0,07–0,12 мм. Зазоры 0,05 мм и менее используют только при высокотемпературной пайке в вакууме и инертных газах. При зазорах 0,15 мм и более прочность соединений становится ниже прочности литого припоя, увеличивается количество пор и шлаковых включений из-за снижения капиллярных свойств (рис. 3).

При пайке пластичными припоями сопротивление отрыву  $\sigma_{в.пс}$  также имеет максимум, хотя и менее выраженный, но при пайке двухфазными припоями этот максимум резко выражен при определенных зазорах (обычно 0,15–0,25 мм) из-за условий первичной кристаллизации [6], в которых наиболее легкоплавкая и менее прочная составляющая, в частности при малых зазорах  $\leq 0,1$  мм, вытесняется к центру шва вместе с газовыми порами и шлаковыми включениями. Прочность соединений при этом падает катастрофически.

Оловянно-свинцовые припои подвержены естественному и искусственному старению. Последнее можно отождествить с эффектом эксплуатационного старения при работе соединений на повышенных температурах. При естественном старении вследствие структурной неоднородности прочность припоев падает в первые 20–50 часов с 55 до 33 МПа и стабилизируется спустя 300 суток. Прочность же паяных соединений при температурах 50, 100 и 150 °C падает одинаково с 62 МПа до 40 МПа в первые 100 часов и далее стабилизируется на уровне 40–36 МПа до 1000 часов в связи с установившейся коагуляцией эвтектики. В общем случае, для пайки соединений применимо понятие конструкционной прочности, поскольку припой, а в ряде случаев и основной металл, претерпевают физико-химические превращения, вызывающие изменения их свойств. Конструкционную прочность или ее специфические характеристики определяют непосредственно в конструктиве или по результатам испытания специальных образцов. Эти характеристики позволяют получить данные, необходимые для расчетов на равнопрочность. Хотя, как будет показано далее, такие расчеты могут носить приближенный характер, что объясняется большим разбросом результатов испытания на прочность в связи с хрупким характером разрушения низкотем-

пературных паяных соединений, низкими скоростями релаксационных процессов и неоднозначностью при различных методах пайки самого основного фактора технологического процесса — условий собственно формирования паяного шва.

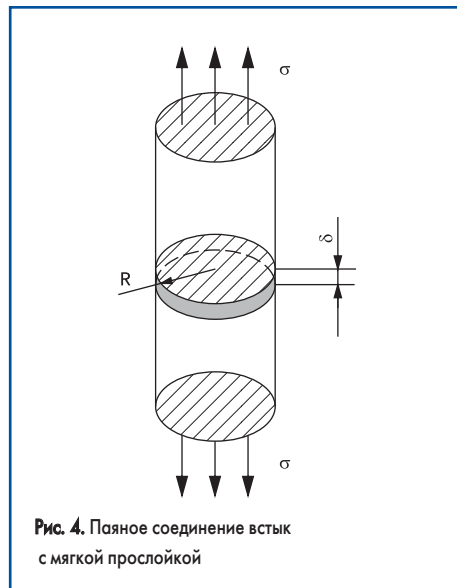
При расчетной оценке прочности паяных соединений необходимо учитывать сложный характер напряженного состояния под нагрузкой. Примем, что напряжения в шве не превышают предела упругости припоя, чтобы использовать схему анализа клеевых и адгезионных соединений. При этом модуль упругости паяного шва  $E_1$  меньше модуля упругости основного металла  $E$ .

При работе стыкового соединения в пределах упругих деформаций паяное соединение или мягкая прослойка испытывают упрочнение. Продольные деформации основного металла  $\epsilon_z = \sigma_z/E$  вызывают поперечное сужение  $\mu \times \epsilon_z$ , а продольные деформации в самой прослойке  $\epsilon'_z = \sigma_z/E_1$  вызывают поперечное сужение прослойки  $\mu \times \epsilon'_z > \mu \times \epsilon_z$  (где  $\mu$  — коэффициент Пуассона). Прослойка подвергается растяжению по радиальным направлениям с напряжениями:

$$\sigma_z = E_1 \times (\epsilon'_z - \epsilon_z) \times \mu. \quad (3)$$

Растягивающие напряжения в окружном направлении  $\sigma_r = \sigma_r$ . Таким образом, в пределах упругих деформаций в кольцевой прослойке реализуется трехосное растяжение, которое вызывает относительно невысокую концентрацию при  $\sigma_i$  и  $\sigma_r \ll \sigma_z$ , но первые способствуют повышению предела текучести  $\sigma_T$  и снижению пластичности. Поле напряжений в прослойке  $\delta$  (рис. 4) изображено на рис. 5. Из теории пластичности известно, что максимальные напряжения возникают на контактных поверхностях спая, и если допустить, что  $E$  и  $E_1$  на этих поверхностях близки по величине, то нормальные напряжения в прослойке в рамках II-й теории прочности (разрушение наступает при достижении предельных удлинений) равны:

$$\sigma_z = \sigma_T [1 + (2/\sqrt{3}) \times (1/\delta) \times (R-r)]. \quad (4)$$



Напряжения по радиусу и касательной:

$$\sigma_r = \sigma_t = \sigma_T \times (2/\sqrt{3}) \times (1/\delta) \times (R-r). \quad (5)$$

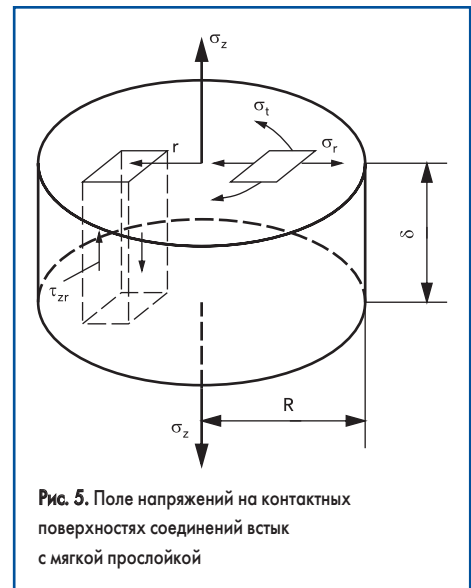
Максимальные напряжения достигаются при  $r = 0$ , то есть:

$$\sigma_z = \sigma_T [1 + (2/\sqrt{3}) \times (R/\delta)], \quad (6)$$

$$\sigma_r = \sigma_t = \sigma_T \times (2/\sqrt{3}) \times (R/\delta). \quad (7)$$

Поскольку для тонкой прослойки отношение  $R/\delta$  очень велико, то такое напряженное состояние в паяном соединении недостижимо, так как до возникновения полной текучести напряжения  $\sigma_z$  достигают предела разрушения стержня, то есть пластический характер разрушения невозможен. Разрушение мягкой прослойки всегда хрупкое, и, как показал опыт, оно имеет место при всех значениях  $E_1 \neq E$  для стыковых соединений [7]. Особенности хрупкого разрушения мы рассмотрим ниже.

В нахлесточных соединениях в результате относительного сдвига соединяемых элементов и искривления под действием изгибающего момента (рис. 6–8) создаются касательные напряжения  $\tau$  и нормальные напряжения  $\sigma_z$  и  $\sigma_r$ , неравномерно распределенные по длине и толщине нахлестки. При этом концентрация касательных напряжений тем выше, чем выше отношение  $E/E_1$ . В зоне спая (там, где образуется диффузионная зона, химические соединения и «прикристаллизованный» слой интерметаллидов) сдвиговые деформации максимальны, и в результате структурной неоднородности, возникающей при кристаллизации, они плохо передаются в толщу паяного шва и практически не релаксируют. Высокая концентрация напряжений приводит к отрыву припоя от основного металла (I-я теория прочности — разрушение от максимальных растягивающих нормальных напряжений). Это особенно характерно, как мы увидим далее, для миниатюрных соединений в электронике, когда полные пластические свойства в малых размерах соединения не реализуются.



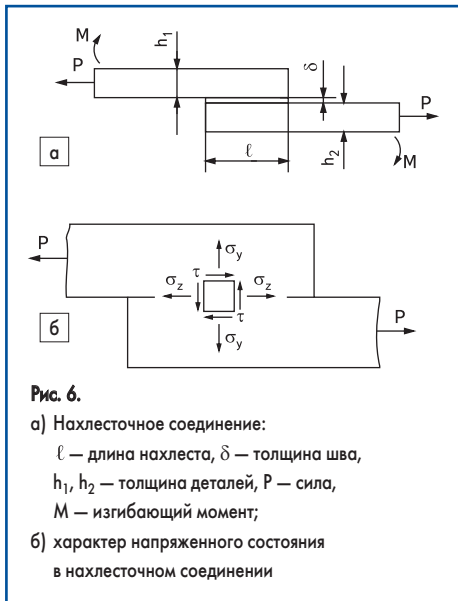


Рис. 6.

а) Нахлесточное соединение:

l — длина нахлеста, δ — толщина шва,  
h<sub>1</sub>, h<sub>2</sub> — толщина деталей, P — сила,  
M — изгибающий момент;

б) характер напряженного состояния  
в нахлесточном соединении

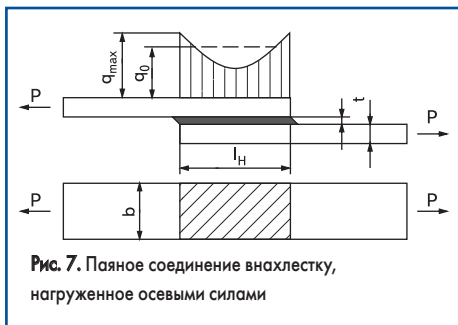


Рис. 7. Паяное соединение внахлестку,  
нагруженное осевыми силами

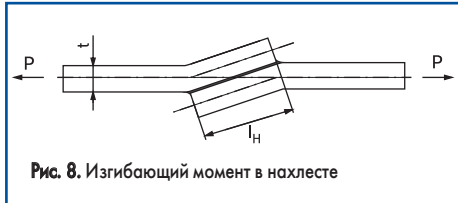


Рис. 8. Изгибающий момент в нахлесте

При пайке таких «жестких» соединений особое внимание следует уделять созданию качественного спаю, то есть выполнению всех условий надлежащего формирования паяного шва с симметричными и плавными галтелями, поскольку наибольшие значения касательных напряжений  $q$  приходятся на край галтели (рис. 7):

$$q_{\max} = \frac{\alpha P}{2} \times \left( \sqrt{\frac{1 + ch \times \alpha \ell_n}{sh \times \alpha \ell_n}} \right), \quad (8)$$

где

$$\alpha = \sqrt{\frac{2G}{E}} \times \frac{b}{F \delta}. \quad (9)$$

Принимая из условий статической равнопрочности  $\ell_n = 2t$ ,  $F = b \times t$ , получим:

$$\alpha \ell = \sqrt{\frac{8G}{E}} \times \frac{t}{\delta}. \quad (10)$$

Коэффициент концентрации напряжений:

$$\beta = \frac{\alpha \ell}{2} \left( \frac{1 + ch \times \alpha \ell}{sh \times \alpha \ell} \right). \quad (11)$$

Чем меньше отношение  $G/E$ , где  $G$  — модуль сдвига паяного шва, а  $E$  — модуль упругости основного металла, тем меньше коэф-

фициент концентрации и тем более вероятно выравнивание  $q_0$  при малых деформациях (рис. 7). Например, для пайки меди припоем ПОС-61 отношение  $G/E \approx 0,04$ , для пайки стали латунию  $G/E \approx 0,4$  (то есть в 10 раз больше), поэтому хрупкое разрушение в последнем случае происходит при напряжениях меньших предела текучести латуни.

Дифференциальное уравнение изогнутого элемента:

$$(d^2y/dx^2) - 2y = 0. \quad (12)$$

где  $\alpha = \sqrt{P/(E \times I)}$ ,  $P$  — нагрузка,  $I$  — момент инерции.

Решение уравнения (12) для максимально изгибающего момента дает:

$$M = \frac{t \alpha^2}{2e^{2/\alpha \ell_n}} E \times I. \quad (13)$$

Величина напряжений от изгиба:

$$\sigma_u = M/W,$$

$$\sigma_u = 3\sigma_p / (1 + \ell_n / t \sqrt{3\delta/E}),$$

где  $W$  — момент сопротивления при изгибе;  $\sigma_p$  — напряжение растяжения.

Теоретический коэффициент концентрации:

$$K_T = 1 + \sigma_u / \sigma_p. \quad (15)$$

При  $t \rightarrow 0$ ,  $\sigma_u \rightarrow 0$   $K_T \approx 1$ . При увеличении толщины до 3 мм  $K_T \approx 4$ , что позволяет в первом приближении оценить сопротивляемость конструктива.

Однако этих расчетных зависимостей еще недостаточно для того, чтобы оценить конструктивную прочность изделий радиоэлектроники, поскольку здесь мы имеем дело не с массивными материалами, а с фольгой, гальваническими и химическими покрытиями, ленточными материалами и т. п. (за исключением проволочных выводов ЭРИ и моточных изделий). Существенное значение для анализа напряженного состояния имеет способ их закрепления, условия приложения и направление действия внешних сил с учетом внутренних напряжений. Эти условия реализуются на базовом несущем конструктиве — печатной плате, которая в конструктивную прочность изделия вносит по сути две свои механо-технологические характеристики — прочность фольги на отдр и сопротивление вырыва металлизированного пистона. Прочность гальванической металлизации на разрыв оценивать бессмысленно. И, наконец, главное — это технологические факторы обеспечения надлежащих условий формирования паяного соединения на плате — использование эффективного флюса, обеспечение оптимальных технологических зазоров, выполнение установленных режимов пайки, а также дозирование припоя, обеспечивающее образование плавных галтелей с гладкой беззудачной поверхностью.

Как показывает 80-летний опыт применения печатных плат, надлежащее формирование паяных соединений на плате решает все

проблемы механической прочности независимо от марки оловянно-свинцового припоя (Г. Штрекфус).

Собственные «прочностные» характеристики печатной платы на стеклотекстолите марки FR4 следующие:

- Усилие разрыва полоски фольги шириной 10 мм и толщиной 35 мкм — 7,7 кгс, что соответствует прочности фольги 22 кгс/мм<sup>2</sup>.
- Усилие отдира фольги под углом 90° с перемещением захвата — 2–2,2 кгс.

Ширина полоски фольги 10 мм выбрана для получения стабильных механических характеристик (см. [8] — с. 169, рис. 1–13).

Согласно ГОСТ 26.246.4-89, усилие отдира 35 мкм фольги шириной 3 мм должно быть не менее 0,14 кгс/мм, что хорошо соответствует нашим данным (0,2–0,22 кгс/мм).

- Усилие отдира фольги ( $b = 10$  мм) с неподвижным захватом и уменьшающимся углом приложения нагрузки с частичным разрывом по фольге — 5 кгс, что достаточно близко к усилию разрыва фольги (7,7 кгс).

- Прочность фольговых контактов на отрыв площадью 1,5–5 мм<sup>2</sup> при отрыве приклеенного или припаянного электрода — 0,9–1,2 кгс/мм<sup>2</sup> (меньшие значения соответствуют меньшей площади контакта). При этом снижения прочности на отрыв при пайке электрода при температуре 260...280 °С паяльником 60 Вт в 20 раз по данным ГОСТ 26.246.4-89 не обнаружено. Не установлено и снижения прочности самой фольги до 8% от исходной. Возможно, эти данные в ГОСТ попали из результатов использования принятых МЭК рекомендаций производить оценку термического влияния при температуре 288 °С в течение 10 с [8], хотя такой эффект термического влияния вызывает определенное сомнение.

- Отрыв корпуса с припаянными планарными выводами типа «крыло чайки» с симметричным выкусыванием половины (4 шт.) выводов для уменьшения усилия отрыва и исключения деформации платы, смежающей разрушение с отрыва на раздир (испытание по Чадвику): усилие отрыва 6,5–7 кгс или 1,68 кгс/вывод, что при площади спаю 0,4 мм<sup>2</sup> соответствует гарантированной прочности паяного соединения  $\sigma_{\delta \min} = 4,2$  кгс/мм<sup>2</sup> (поскольку имеет место вырыв планарных выводов из корпуса и иногда отрыв одной из контактных площадок  $S = 1,5$  мм<sup>2</sup>).

- Отрыв корпуса с J-выводами по пайке с усилием отрыва 8,4 кгс или 2,1 кгс на паяное соединение площадью 0,375 мм<sup>2</sup>, что соответствует прочности припоя 5,6 кгс/мм<sup>2</sup>. В отличие от предыдущего случая («крыло чайки»), разрушение по спаю объясняется увеличенным зазором по краям дуги J-выводов до 0,4 мм против 0,2 мм на внутренней стороне планарного вывода.

- Испытания на вырыв медного проводника из запаянного металлизированного отверстия показывают, что при диаметре проводников до 0,6 мм и диаметре отверстия 0,8 мм разрушение происходит с разрывом медного проводника с прочностью 22 кгс/мм<sup>2</sup>.



Для диаметра проводника 1,0 мм и отверстия 1,3 мм с контактной площадкой 2,4 мм при толщине платы 1 мм разрушение происходит с вырывом металлизации и отрывом верхней контактной площадки с усилием 14 кгс. При площади среза металлизации и галтелей с учетом площади отрыва контактной площадки (суммарно 6,7 мм<sup>2</sup>), сопротивление вырыву металлизации составляет 2,1 кгс/мм<sup>2</sup>, что близко к  $\tau_{cp}$  припоя ПОС-61 (рис. 2). Это объясняется своеобразным «прижимом» металлизации отверстия схемой трехосного растяжения припоя в цилиндрической прослойке паяного соединения [9].

Используя результат последних испытаний, можно легко провести простой расчет на равнопрочность пайки элементов с осевыми выводами в отверстия:

$$\text{приравняв } 2\pi r_{\text{отв}} \times \ell_n \times \tau_v = 2\pi r_v^2 \times \sigma_{v\text{Си}} \quad (16)$$

и положив  $r_{\text{отв}} = r_{\text{вывода}}$ ,  $\ell_n = t_{\text{пл}} + 1$  мм (высота галтелей по 0,5 мм),  $\tau_v = 2,1$  кгс/мм<sup>2</sup> из эксперимента, а  $\sigma_{v\text{Си}} = 22$  кгс/мм<sup>2</sup>, получим:

$$2 \ell_n \tau_v = r_v \sigma_{v\text{Си}} \quad \text{или} \\ t_{\text{пл}} = (r_v \times 22) / (2 \times 2,1) - 1 \approx 5,5 \times r_v - 1. \quad (17)$$

Например, при пайке вывода диаметром 0,5 мм ( $r = 0,25$ ) достаточно толщины платы 0,4 мм, чтобы разрушение произошло с разрывом вывода.

Другой практически важной задачей, в особенности в силовой электронике, может стать расчет необходимости дополнительного крепления тяжелых моточных изделий (дросселей, трансформаторов) паяных за выводы обмотки в отверстия. Но вместо простой статической задачи мы несколько усложним условия: предположим, что условием нагружения является технологическая тряска, адекватная транспортировке изделий на автомашине «Газель» с диаметром колеса 60 см, которое за один оборот при движении автомобиля со скоростью 60 км/ч встречает одно препятствие с амплитудой 5 см. Величина знакопеременной нагрузки при синусоидальных колебаниях транспортировки  $\dot{y} = A \times \sin \omega t$  с ускорением:  $\ddot{y} = A \times \omega^2 \times \sin \omega$  при  $\omega = 2\pi f$ , где  $f = 4$  Гц определится как

$$F = m \times A \omega^2, \quad (18)$$

где  $A$  — амплитуда колебаний  $5 \times 10^{-2}$  м,  $m$  — масса моточного изделия, которая, положим, равна 1 кг, или

$$F = 1 \times 5 \times 10^{-2} \times (6,28 \times 4)^2 = 31,6 \text{ Н} = 3,1 \text{ кгс}. \quad (19)$$

Заметим, что расчетная частота колебаний 4 Гц почти соответствует частоте колебаний от винта вертолета, равной 4,7 Гц, которую обычно указывают в своих ТЗ заказчики из Юго-Восточной Азии.

Для статической нагрузки коэффициент запаса  $K = 2,5$ . При предельном напряжении вы-

рыва металлизации  $\tau_v = 2,1$  кгс/мм<sup>2</sup> из предыдущей задачи, допускаемое статическое напряжение равно:  $\tau_g = \tau_p / K = 2,1 / 2,5 = 0,84$  кгс/мм<sup>2</sup>. При работе на переменных нагрузках допускаемые напряжения устанавливаются с учетом коэффициента  $\gamma$  [7], определяемом по выражению:

$$\gamma = 1 / (0,6\beta \pm 0,2 - (0,6\beta \pm 0,2) \times r), \quad (20)$$

где  $\beta$  — эффективный коэффициент концентрации, который в стыковых соединениях равен 1,2, внахлестку — 3,0, в телескопических (пайка в отверстие) — 2,0;  $r = \sigma_{\text{min}} / \sigma_{\text{max}} = -1$ ; верхние знаки в знаменателе для растяжения, нижние — для сжатия.

Тогда

$$\gamma = 1 / (0,6 \times 2 + 0,2 - (0,6 \times 2 - 0,2) \times (-1)) = 1 / 2,4.$$

Допускаемое напряжение знакопеременного характера  $[\tau]_{-1} = [\tau_g] / \gamma = 0,84 / 2,4 = 0,35$  кгс/мм<sup>2</sup>.

Необходимая площадь нахлестки для расчетной нагрузки по формуле (19), адекватная толщине платы, равна:

$$F_H = P / [\tau]_{-1} = 3,1 / 0,35 = 8,9 \text{ мм}^2.$$

Полагая, что моточное изделие крепится пайкой 4 выводов диаметром 0,8 мм в отверстия диаметром 1 мм, найдем:

$$2\pi r \times \ell_n = 8,9 / 4 = 2,2 \text{ мм}^2,$$

откуда для  $r = 0,5$  мм:

$$\ell_n = 2,2 / (2 \times 0,5 \times 3,14) = 0,7 \text{ мм}.$$

Без учета прочности галтелей можно считать, что при стандартной толщине стеклотекстолита 0,8 мм паяные соединения 4 выводов без дополнительного крепления термоклеем или хомутом удержат моточное изделие при транспортировке без разрушения металлизации. Характерно, что рекомендации по испытанию изделий на вибростендах устанавливаются для транспортной тряски величину ускорения в 2,5 g, что адекватно такому в формуле (19) ( $6,28 \times 4 = 25,12 \text{ м/с}^2$ ).

Надо сразу же оговориться, что все испытания осуществлялись с использованием пайки припоем ПОС-61 с эффективным водосмываемым флюсом ФПС-8Т и паяльной пастой ПС ПОС-61К с неудаляемыми поликонденсирующимися остатками [10]. Данные материалы обеспечивают надлежащее формирование и эксплуатационную надежность паяных соединений, что особенно важно для усталостных характеристик, поскольку предел выносливости паяных соединений качественно зависит от химической активности флюса и режимов пайки. Недостаточная растекаемость, неравномерный фронт смачивания, структурное текстурирование припоя и иные потенциальные концентраторы напряжений главным образом определяют усталостные характеристики соединений. Так, по С. В. Серенсену, переход от полированных образцов к шлифованным снижает предел выносливо-

сти на 10%; к грубо отшлифованным — на 20%; к фрезерованным — на 45%. Иными словами, обеспечение надлежащего формирования паяных соединений с применением стандартного припоя ПОС-61 в принципе решает любую проблему прочности паяных соединений в электронике, о чем свидетельствует огромный опыт производства. Что касается принципиальной стороны вопроса, относительно хрупкого разрушения «мягкой прослойки», то надо правильно трансформировать физико-химические особенности процесса на технологические режимы пайки. Любые металлы идеально хрупко не разрушаются. Хрупкая трещина тоже развивается в результате пластической деформации. При межзеренном разрушении однофазных припоев эта трещина распространяется по границам зерен. Режим пайки и термоусловия эксплуатации не должны допускать рекристаллизации таких припоев. В двухфазных припоях трещина распространяется вдоль межфазной поверхности. В этом случае припой структурно должен представлять собой механическую смесь, что технологически достигается путем выбора оптимального зазора.

Что касается собственно химических соединений, то здесь дело сложнее. Одинарный слой химического соединения, образующийся на поверхности металла в жидком припое в кинетической стадии процесса растворения и имеющий толщину, как правило, до 5 мкм, не влияет на прочность соединения (не принимая во внимание изменение прочностных свойств припоя за счет собственно растворения основного металла). Прикристаллизованный к нему разрозненный слой того же соединения в виде пластинчатой фазы (рис. 9, серебро, медь) при длительных выдержках более 30 с снижает прочность и пластичность на 10–15%. Игольчатые и перьевые кристаллизационные включения (рис. 10, золото) снижают все прочностные свойства на 50%. Особенно страдает при этом пластичность шва при



**Рис. 9.** Паяное соединение по серебряному покрытию (240 °С; 25 с;  $\times 1000$ )

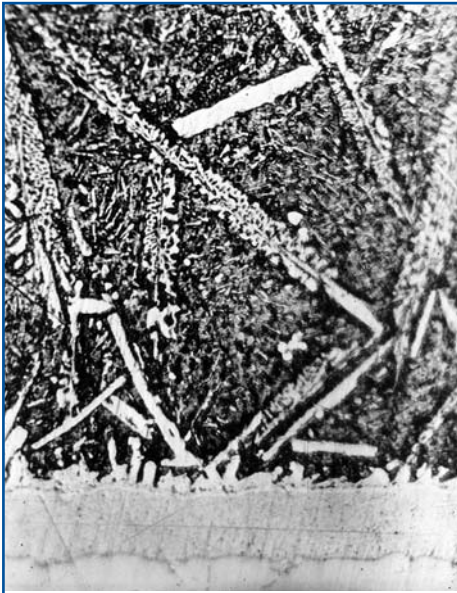


Рис. 10. Паяное соединение по золотому покрытию. Первевая структура AuSn<sub>4</sub> (240 °C; 5 с; ×1000)

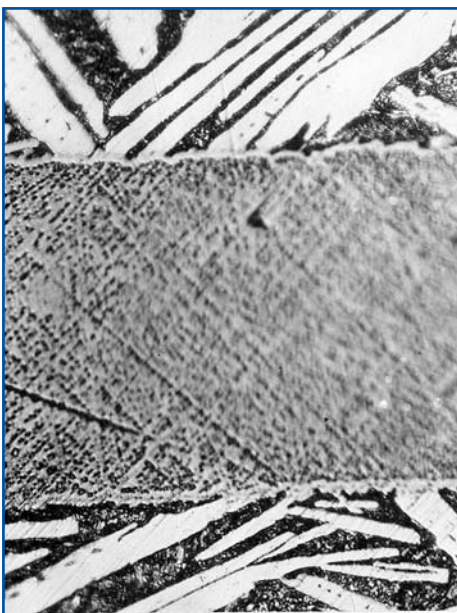


Рис. 11. Плоскопластинчатая коагуляция первевой структуры AuSn<sub>4</sub>. Отслоения от подслоя еще нет [12]. (240 °C; 25 с; ×1000)

действию касательных напряжений поперек кристаллитов. И, наконец, перерастание игольчатой и перьевой фазы в крупную плоскопластинчатую форму (рис. 11) при увеличении времени выдержки и температуры (для золота — свыше 240°) снижает прочность соединений практически до нуля. Следует отметить, что пайка плат по иммерсионному золоту, толщина которого 0,2 мкм, не может привести к образованию структур, представленных на рис. 10–11, поскольку при полном мгновенном растворении золотого покрытия концентрация золота в припое при зазорах 0,05–0,1 мм не превысит 1%.

Опасно другое — образование «черной контактной площадки», связанное с отсутствием смачивания никеля с 9% фосфора при нарушении технологии никелирования, что при-

Таблица 2. Изменение  $\sigma_b$  в МН/м<sup>2</sup> (кгс/мм<sup>2</sup>) и  $\delta$  в % оловянных припоев при различных температурах (до 200 °C)

Температура испытания, °C	60% Sn и 40% Pb		40% Sn и 60% Pb		95% Sn и 5% Sb		93% Sn и 4% Ag
	$\sigma_b$	$\delta$	$\sigma_b$	$\delta$	$\sigma_b$	$\delta$	$\sigma_b$
20	56,3 (5,75)	60	52,4 (5,35)	55	40,8 (4,17)	43	53,9 (5,51)
50	46,3 (4,73)	80	43,2 (4,41)	72	38,6 (3,94)	45	46,3 (4,73)
75	41,6 (4,25)	90	38,6 (3,94)	80	– (–)	–	– (–)
100	30,8 (3,15)	110	24,7 (2,52)	98	27,8 (2,84)	50	24,6 (2,52)
125	19,4 (1,97)	180	15,5 (1,58)	200	22,3 (2,28)	–	18,7 (1,90)
150	12,3 (1,26)	180	11,5 (1,18)	200	22,3 (2,28)	45	18,4 (1,89)
200	Расплавление		Расплавление		11,56 (1,18)	45	11,5 (1,18)
300	Расплавление		Расплавление		7,2 (0,79)	40	– (–)

водит к отслоению паяного соединения от подслоя [12].

Многослойные диффузионно-реакционные слои также отслаиваются чрезвычайно хрупко. Дело в том, что по законам диффузии двухфазные области диаграмм состояния в реакционных и диффузионных слоях не образуются. Это приводит к отсутствию переходной физико-химической связи между различными стехиометрическими образованиями. Исключения составляют соединения с широкой областью гомогенности.

Глобулярные химические соединения (в частности, свинца) могут в некоторой степени повышать прочность соединений, но их роль нивелируется оловянными. Дисперсионное упрочнение легкоплавких припоев пока не известно.

Казалось бы, в изложенном все понятно и просто. Однако проблема осложняется тем, что сегодня мы имеем широкий набор различных базовых материалов и покрытий, которые в совокупности в одном изделии не могут обеспечить надлежащее формирование паяных соединений, поскольку для них не существует адекватного режима пайки. Попытки найти какой-то оптимум привели к тому, что возникла неопределенность с неудаляемыми флюсами и композициями паст, которые стали повсеместно удалять из-за изменения их внешнего вида и свойств, используя высокотоксичные растворители типа Zestron, ссылаясь на какие-то явно несоответствующие экологические сведения. Дело в том, что растворители, разрушающие структуру поликонденсации композиций (ковалентная связь), по определению не могут быть химически безвредными. Еще более существенное усложнение вносит бессвинцовая технология. Поражает безответственность такой серьезной организации, как ЕС, которая рискнула решить сложную научно-техническую проблему с помощью «Директивы», разделив при этом выпускаемую продукцию на «ответственную» (оборона, медицина, космос и т. д.), для которой сохраняется старая технология и на... «безответственную»? Не думаю, что серьезный потребитель согласится покупать радиоэлектронную аппаратуру сомнительного качества, поскольку... «распределение» продукции в стране давно отменили!

С другой стороны, в верхних эшелонах власти давно говорят об отечественном производителе, использовании отечественных технологических материалов, которые ничуть не уступают зарубежным, а также об использовании отечественной элементной базы, которой... пока нет!? Какие же реальные задачи берет на

себя в этих условиях сегодняшний производитель по бессвинцовой технологии, помимо тех созданных им трудностей, которые он решил успешно преодолевать?

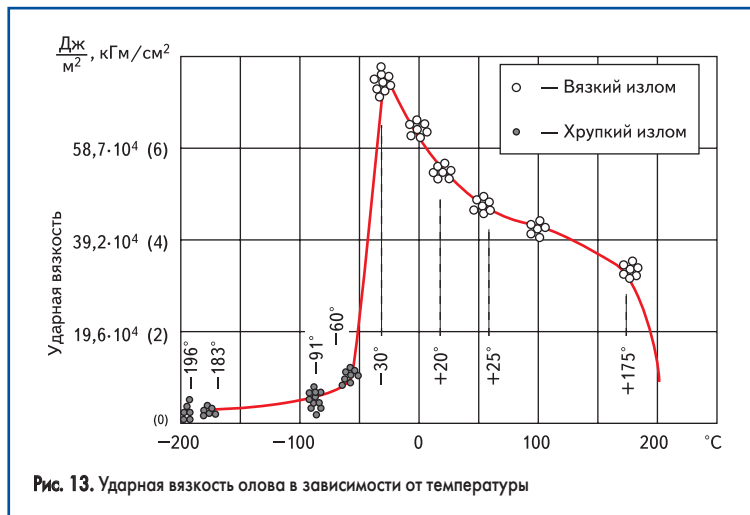
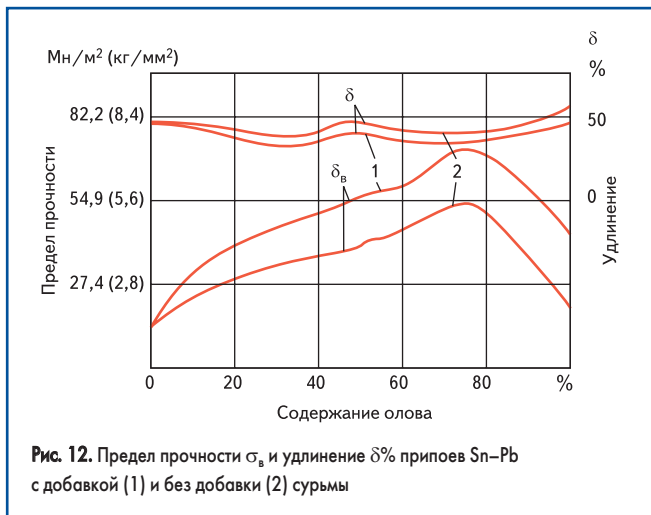
Припои типа SAC известны давно, но в России их не выпускают (не технологичны по результатам исследований МЭП, МРП и МПСС в 1966–67 гг.). И когда сегодня используется импортный припой или паста на основе ПОС-61, конструктор хитро пишет в КД «паять ПОС-61, ГОСТ 21930-76», поскольку зарубежная техдокументация не имеет права гражданства в России. Но с припоями типа SAC такая хитрость не пройдет, не говоря уже об отчетности за драгметаллы.

Известно, что при повышенных температурах (табл. 2), соответствующих эксплуатационным (до 100 °C), прочность их ниже на 20% по сравнению с ПОС-61. Сомнительны и значения прочности при 20 °C (5,5 кгс/мм<sup>2</sup>), так как по данным известного американского специалиста по пайке Г. Манко (рис. 12), прочность олова с более эффективным упрочнителем — сурьмой — 2,5 кгс/мм<sup>2</sup>. А вот при отрицательных температурах порядка –50 °C ударная вязкость олова предельно низка (рис. 13), причем не за счет фазовой перекристаллизации («оловянная чума»), а микроструктурно. Автором проведены сравнительные испытания тонких стандартных образцов 0,5×10×100 мм с расчетной длиной 50 мм припоев SAC (Multicore) и ПОС-61 («Русское олово») (табл. 3).

Казалось бы, вполне приличные свойства при низкой пластичности тонких образцов (см. пояснения к рис. 6–8 и таблице 1, припой ПОИнкС), но настораживает резкое возрастание пластичности SAC после отжига, что свидетельствует о явной двухфазности структуры и неизбежном появлении уже рассмотренных проблем с температурными режимами и оптимизацией зазоров. Последнее для поверхностного монтажа предполагает пересмотр топологии контактов, а это уже серьезная проблема, учитывая, что при плохой растекаемости SAC последний как бы «выпучивается» при плавлении, поднимая на контактных площадках элемент, тем самым увеличивая зазор и снижая прочность соединений (см. пояснения к рис. 3).

Профессиональное исследование процесса пайки показывает, что при ручной пайке минимальная температура жала паяльника для SAC — 290 °C с увеличением против стандарта времени нагрева до 5 с. Оптимальная температура жала — 320 °C, то есть всем известное на 100 °C превышение над температурой





**Таблица 3.** Прочность припоев SAC и ПОС-61 на тонких образцах

Состояние	Припой	ПОС-61		SAC	
		$\sigma_v$ , кг/мм <sup>2</sup>	$\delta$ , %	$\sigma_v$ , кг/мм <sup>2</sup>	$\delta$ , %
Прокат, 20 °С		4,0	4,0	3,2	2,5
Отжиг, 125 °С		3,8	5,0	3,0	7,0

плавления. Краевой угол смачивания олова по методике автора [13] при 320 °С — 28°, а ПОС-61 при 260 °С — 4°. И ничего другого быть не может (исключая добавки к флюсу суперактивных поверхностных веществ), поскольку самопроизвольное растекание припоя — это конкуренция скоростей вязкого течения и поверхностной диффузии, в которой первая побеждает только с температурой. При пайке поверхностного монтажа спасает только одно — «принудительное растекание», то есть нанесение пасты на всю площадь контакта, где она сплавляется с плавящимся в первую очередь покрытием HASL или иммерсионным оловом. Тем не менее, повышение температуры ручной пайки до 300–320 °С, волновой до 290 °С и пайки оплавлением до 280 °С с целью обеспечения надлежащего формирования паяных соединений влечет за собой замену конструктивных (стеклотекстолит, пластмассовые корпуса и т. п.) и технологических («выпотевающие» солдермаски, пироли-

зирующиеся флюсы, адгезивы, клеящие ленты и т. п.) материалов, включая изменения в ТУ на элементную базу.

Что касается различных ухищрений, например использования азота, то техническая достоверность данных «Sovtest» (г. Курск) в брошюре «Краткий справочник по бессвинцовой пайке» (рис. 14) вызывает сомнения. Азот как инертный газ принципиально не может повлиять на смачивание. В лучшем случае, он только может сохранить исходную смачиваемость при повторном оплавлении — и все! Поэтому не ясно, к какому процессу относятся представленные кривые, и если подобное имеет место, это значит, что флюс не выполняет своих защитных свойств, и надо заниматься флюсом, а не азотом. Тем более, что по результатам немецких исследований [14], эффект от использования азота равен нулю. Никто не против экологической безопасности по свинцу: важен тот эффект, который получает производство и уровень его технологической ценности, а не технологических потуг! К этим и другим вопросам автор надеется вернуться в следующей публикации.

### Литература

1. Давиденков Н. Н. Динамические испытания металлов. ОНТИ, 1936.

2. Фридман Я. Б. Единая теория прочности. Оборонгиз, 1943.  
 3. Потак Я. М. Хрупкое разрушение стали и стальных деталей. М.: Оборонгиз, 1955.  
 4. Парфенов А. Н. Основы феноменологической теории ЖМХ в аспекте кинетики топохимических реакций. В сб. международной научно-технической конференции «Пайка. Современные технологии, материалы конструкции. Опыт эксплуатации паяных соединений». М.: ЦРДЗ, 2003.  
 5. Золоторевский В. С. Механические испытания и свойства металлов. М.: Металлургия, 1974.  
 6. Парфенова Л. В., Парфенов А. Н. и др. Прочность соединений при пайке двухфазными припоями // Сварочное производство. 1976. № 1.  
 7. Николаев Г. А., Киселев А. И. Работа мягкой прослойки паяных соединений // Сварочное производство. 1960. № 12.  
 8. Технологии в производстве электроники. Справочник под ред. Семенова П. В. Часть II. Производство печатных плат. М.: Изд. Дом «Технологии», 2007.  
 9. Кузнецов О. А., Погалов А. И. Прочность паяных соединений. М.: Машиностроение, 1987.  
 10. Парфенов А. Н. Низкотемпературные припой и флюсы. Справочник по пайке под ред. И. Е. Петрунина. Изд. 3-е, гл. 4. М.: Машиностроение, 2003.  
 11. Парфенов А. Н. Исследование кинетики растворения меди, никеля, серебра, золота, палладия и родия в оловянно-свинцовых припоях. Диссертация..., к. т. н., М.: МАТИ, 1973.  
 12. Парфенов А. Н. Проблема черной контактной площадки и иммерсионного золочения // Практическая силовая электроника. 2003. № 12.  
 13. Парфенов А. Н. Феноменологическая теория смачивания и растекания расплавов. В сб. международного семинара: «Пайка. Современные технологии, материалы, конструкции». М.: ЦРДЗ. 2001. № 2.  
 14. Парфенов А. Н. Еще раз о европейской бессвинцовщине // Технологии в электронной промышленности. 2006. № 5.

