

# Оптимизация температурного профиля пайки оплавлением

В статье описываются исходные данные для теоретического построения температурного профиля пайки оплавлением исходя из основных влияющих факторов.

Максим Шмаков

mxxm-shmakov@yandex.ru

Александр Тиханкин

Оплавление паяльной пасты является основным методом формирования паяных соединений при сборке печатных узлов (ПУ) по технологии поверхностного монтажа. При правильном применении пайка оплавлением обеспечивает высокий выход годной продукции, ее высокую надежность и низкую себестоимость. Среди всех условий данного процесса температурный профиль пайки — один из наиболее важных моментов, определяющий уровень дефектов при пайке [1].

Основными факторами, влияющими на формирование температурного профиля пайки оплавлением, являются (рис. 1):

- компоненты;
- печатные платы (ПП);
- паяльная паста;
- оборудование.

Рассмотрим два типа температурного профиля (рис. 2):

- традиционный (полочный);
- новый (линейный).

Температурный профиль пайки можно разделить на четыре основные стадии:

- 1) предварительный нагрев;
- 2) стабилизация (зона температурного выравнивания);
- 3) оплавление;
- 4) охлаждение.

Каждая из которых оказывает свое влияние на результаты пайки.

## Стадия предварительного нагрева

Данный этап позволяет снизить тепловой удар на электронные компоненты и печатные платы (ПП). В процессе предварительного нагрева происходит испарение растворителя из паяльной пасты.

При использовании паяльных паст для «свинцовой» технологии (на основе сплавов Sn62/Pb36/Ag2 и Sn63/Pb37) предварительный нагрев рекомендуется осуществлять до температуры 95–130 °С, скорость повышения температуры для традиционного профиля 2–4 °С/с, для нового — 0,5–1 °С/с.

**Примечание.** Завышение скорости предварительного нагрева может приводить к преждевременному испарению растворителя, содержащегося в паяльной пасте.

## Стадия стабилизации

Стадия стабилизации позволяет активизировать флюсующую составляющую и удалить избыток влаги из паяльной пасты. Повышение температуры на этой стадии происходит очень медленно. Стадию стабилизации также называют стадией температурно-



Рис. 1. Основные факторы, влияющие на формирование температурного профиля пайки оплавлением

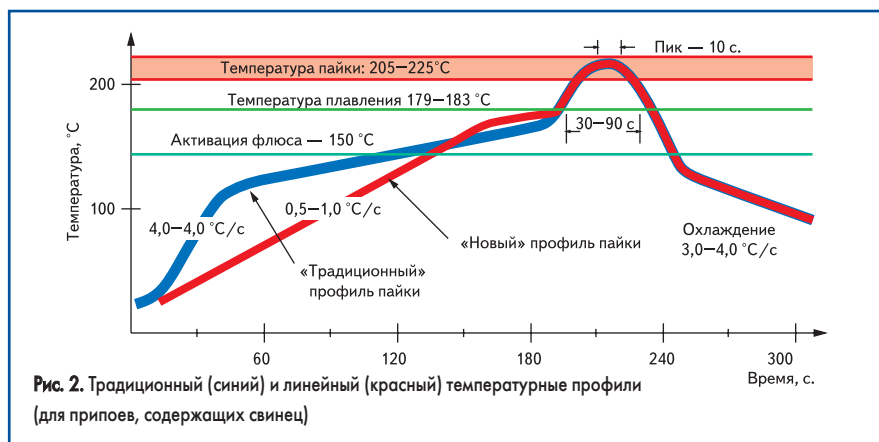


Рис. 2. Традиционный (синий) и линейный (красный) температурные профили (для припоев, содержащих свинец)

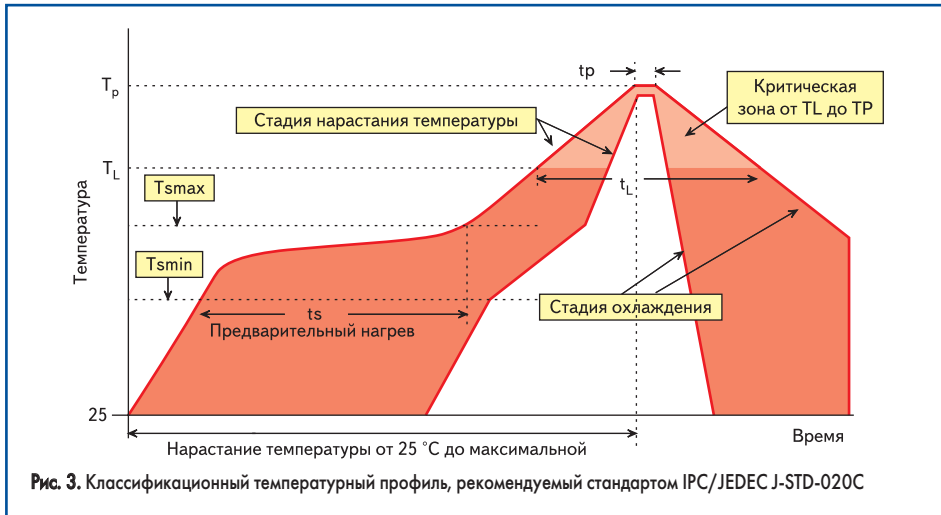


Рис. 3. Классификационный температурный профиль, рекомендуемый стандартом IPC/JEDEC J-STD-020C

го выравнивания, так как эта стадия должна обеспечивать нагрев всех компонентов на плате до одинаковой температуры, что предотвращает повреждение компонентов за счет теплового удара.

Максимальная активация флюса происходит при температуре около 150 °С. Рекомендуемое время стабилизации для традиционного профиля составляет 90–150 с. В новом профиле время стабилизации 30 с считается достаточным. В конце зоны стабилизации температура обычно достигает 150–170 °С.

**Примечание.** Сокращение времени стабилизации может приводить к дефектам типа «холодная пайка» и эффекту «надгробного камня».

### Стадия оплавления

На стадии оплавления температура повышается до расплавления припоя пасты и происходит формирование паяного соединения.

Для образования надежного паяного соединения максимальная температура пайки должна на 30–40 °С превышать точку плавления паяльной пасты и составлять 205–225 °С (на плате). Время, в течение которого печатная плата находится выше точки плавления (179–183 °С), должно быть в пределах 30–90 с, предпочтительно не более 60 с. Скорость повышения температуры в зоне оплавления должна составлять 2–4 °С/с.

**Примечание.** Низкая температура пайки обеспечивает слабую смачиваемость, особенно для компонентов с плохой паяемостью.

### Стадия охлаждения

Для обеспечения максимальной прочности паяных соединений скорость охлаждения должна стремиться к максимально допустимой. Рекомендуемая скорость охлаждения 3–4 °С/с до температуры ниже 130 °С [2].

**Примечание.** Завышение скорости принудительного охлаждения может приводить к возникновению больших внутренних напряжений в печатной плате из-за различного коэффициента теплового расширения базового материала печатных плат, корпусов компонентов, металлических печатных проводников и металлизированных отверстий.

По результатами экспериментальных паяк для разработки температурного профиля следует учитывать, что реальная температура на плате в ходе выполнения стадий процесса пайки будет на 10–20 °С ниже при применении инфракрасных систем нагрева и на 20–30 °С ниже установленной в печи конвекционного оплавления.

Отклонение от допустимых параметров может приводить к образованию дефектов:

- плохое смачивание;
- расползание пасты и образование перемычек;
- эффект «надгробного камня» и «холодная пайка»;
- образование бусинок припоя;
- капиллярное затекание припоя;
- растрескивание компонента, а также отслоение припоя или контактной площадки из-за внутренних напряжений;
- образование пустот;
- деформация паяных соединений;
- отсутствие контакта.

На рис. 3 показан классификационный температурный профиль, рекомендуемый стандартом IPC/JEDEC J-STD-020C.

В таблице 1 приведены параметры классификационного профиля, рекомендуемые стандартом IPC/JEDEC J-STD-020C.

При переходе на бессвинцовую технологию необходимо уделять внимание: температурам стеклования печатных плат T<sub>g</sub> и их короблению; максимально допустимым температурам

Таблица 1. Параметры классификационного профиля, рекомендуемые стандартом IPC/JEDEC J-STD-020C

Параметры профиля	Sn – Pb	Pb – free
Скорость нарастания температуры (от T <sub>smax</sub> до T <sub>p</sub> ), °С/с	3, макс.	3, макс.
Предварительный нагрев T <sub>smin</sub> , °С T <sub>smax</sub> , °С Время нарастания от T <sub>smin</sub> до T <sub>smax</sub> , с	100 150 60–120	150 200 60–120
Параметры оплавления Температура (T <sub>l</sub> ), °С Время (t <sub>l</sub> ), с	183 60–150	217 60–150
Максимальная температура T <sub>p</sub>	См. табл. 2	См. табл. 3
Время нахождения в температурном диапазоне от (T <sub>p</sub> – 5) до T <sub>p</sub> , с	10–30	20–40
Скорость снижения температуры, °С/с	6, макс.	6, макс.
Время нарастания температуры от 25 °С до T <sub>p</sub> , мин	6, макс.	8, макс.

Примечание. Все температуры измеряются на верхней поверхности корпуса компонентов.

Таблица 2. Максимальная температура оплавления T<sub>p</sub>, рекомендуемая стандартом IPC/JEDEC J-STD-020C для припоев, содержащих свинец

Толщина корпуса	Объем корпуса, мм <sup>3</sup>	
	<350	≥350
<2,5 мм	240 +0/-5 °С	225 +0/-5 °С
≥2,5 мм	225 +0/-5 °С	225 +0/-5 °С

Таблица 3. Максимальная температура оплавления T<sub>p</sub>, рекомендуемая стандартом IPC/JEDEC J-STD-020C для бессвинцовых припоев

Толщина корпуса	Объем корпуса, мм <sup>3</sup>		
	<350	350–2000	≥2000
<1,6 мм	260 °С	260 °С	260 °С
1,6–2,5 мм	260 °С	250 °С	245 °С
>2,5 мм	260 °С	245 °С	245 °С

T<sub>p</sub> и градиентам температур [gradient (K/sec)] для компонентов; а также разбросу температур в рабочей зоне ΔT, результатом чего является более узкое технологическое окно процесса.

В таблице 4 для примера приведены параметры температурного профиля, рекомендуемые некоторыми производителями компонентов, выполненных для бессвинцовой технологии [3].

Таблица 4. Параметры температурного профиля, рекомендуемые производителями электронных компонентов

Компания-производитель электронных компонентов	T <sub>p</sub> , °С	t <sub>p</sub> , с > 217 °С	Рекомендуемая скорость, °С/с	
			нарастания температуры	снижения температуры
National Semiconductor/LLP	235–240	35–80	0,8–1,2	1–2
Xilinx CSP	255–260	45–120	1–3	1–3
Xilinx BGA	245–250	45–120	1–3	1–3
Xilinx Flip Chip	245–250	45–120	1–3	1–3
AMD BGA	240–245	35–80	0,8–1,2	1–2
Atmel	255–260	35–80	3	6
International Rectifier	255–260	35–80	3	6
Intersil	235–240	35–80	3	6
NIC MLCC	255–270	60	2	2
Matsushita/Panasonic	235–240	45–120	1–3	1–3
ST Microelectronics	245–250	45–120	1–3	1–3

Таблица 5. Требуемые характеристики температурного профиля для минимизации дефектов

Дефект	Механизм образования дефекта	Требуемые характеристики профиля	Скорость нарастания температуры	Максимальная температура	Скорость снижения температуры
Растрескивание компонентов	Слишком высокое внутреннее напряжение из-за высокой скорости изменения температуры	Невысокая скорость изменения температуры	Низкая		Низкая
Эффект «надгробного камня»	Неравномерное смачивание с разных концов чип-компонента	Медленное нарастание температуры вблизи точки плавления припоя для минимизации разброса температур около чип-компонента	Низкая		
Сдвиг компонента	Неравномерное смачивание с разных концов чип-компонента	Медленное нарастание температуры вблизи точки плавления припоя для минимизации разброса температур около чип-компонента	Низкая		
Капиллярное затекание припоя на вывод компонента	Температура выводов больше, чем температура ПП	Медленное нарастание температуры, чтобы позволить плате и компонентам достичь одинаковой температуры перед оплавлением припоя; более интенсивный нагрев снизу	Низкая		
Образование шариков припоя	Разбрызгивание припоя	Медленное нарастание температуры для постепенного нарастания растворителей в паяльной пасте и влаги	Низкая		
Образование шариков припоя	Чрезмерное окисление до оплавления припоя	Минимизация подводимого тепла до достижения температуры пайки (медленное нарастание температуры, отсутствие плоской зоны профиля на стадии стабилизации) для уменьшения окисления	Низкая		
Расползание пасты во время пайки	Снижение вязкости при увеличении температуры	Медленное нарастание температуры для постепенного испарения растворителей для слишком сильного снижения вязкости	Низкая		
Образование перемычек	Расползание пасты	Медленное нарастание температуры для постепенного испарения растворителей для слишком сильного снижения вязкости	Низкая		
Образование бусинок контакта	Интенсивная дегазация под компоненты с малым зазором между нижней поверхностью и ПП	Медленное нарастание температуры перед оплавлением для снижения интенсивности газовыделений из паяльной пасты	Низкая		
Отсутствие контакта	Капиллярное затекание припоя на выводы компонентов	Медленное нарастание температуры, чтобы позволить плате и компонентам достичь одинаковой температуры перед оплавлением припоя; более интенсивный нагрев снизу			
	Отсутствие смачивания	Минимизация подводимого тепла до достижения температуры пайки (минимизация зоны стабилизации или использование профиля с линейным нарастанием от комнатной температуры до точки плавления припоя) для снижения окисления	Низкая		
Слабое смачивание	Чрезмерное окисление	Минимизация подводимого тепла до достижения температуры пайки (минимизация зоны стабилизации или использование профиля с линейным нарастанием от комнатной температуры до точки плавления припоя) для снижения окисления	Низкая		
Образование пустот	Чрезмерное окисление	Минимизация подводимого тепла до достижения температуры пайки (минимизация зоны стабилизации или использование профиля с линейным нарастанием от комнатной температуры до точки плавления припоя) для снижения окисления			
	Оставшиеся составляющие флюса имеют слишком высокую вязкость	Профиль пайки с более низкой температурой для того, чтобы сохранить большее количество растворителя в оставшемся флюсе		Низкая	
Обугливание	Перегрев	Более низкая температура, меньшее время пайки		Низкая	Высокая
Выщелачивание	Перегрев при температурах выше точки плавления припоя	Минимизация подводимого тепла при температурах выше точки плавления припоя с помощью снижения температуры, сокращение времени пайки		Низкая	Высокая
Уменьшение смачивающей способности	Перегрев при температурах выше точки плавления припоя	Минимизация подводимого тепла при температурах выше точки плавления припоя с помощью снижения температуры, сокращение времени пайки		Низкая	Высокая
«Холодная пайка»	Плохое сливание частиц припоя	Достаточно высокая максимальная температура		Средняя	
Слишком толстый слой интерметаллического соединения	Слишком высокий уровень подводимого тепла выше точки плавления припоя	Снижение максимальной температуры, сокращение продолжительности стадии пайки		Низкая	Высокая
Крупнозернистая структура	Эффект отжига из-за низкой скорости охлаждения	Более быстрое охлаждение			Высокая
Отслоение припоя или контактной площадки	Большое механическое напряжение из-за несоответствия коэффициентов теплового расширения	Более медленное охлаждение			Низкая

Следовательно, минимальная температура, необходимая для образования интерметаллического соединения, при использовании бессвинцовых припоев увеличивается до 235–260 °С. По существу, это означает общее повышение температуры в рабочей зоне на 30–40 °С.

В таблице 5 перечислены основные типы дефектов, относящихся к пайке, механизмы образования этих дефектов и требуемые характеристики температурного профиля [1].

Как видно из таблицы 5, доминирующая тенденция, приводящая к образованию дефектов, — это медленное или слишком быстрое нарастание температуры на стадии предвари-

тельного подогрева, низкая максимальная температура и быстрое охлаждение.

### Заключение

Теоретическое построение профиля пайки является лишь исходной информацией для его создания. Но, несмотря на все выше сказанное, окончательная корректировка температурного профиля производится технологом исходя из конструкции печатной платы; количества, типа и размеров компонентов; типа используемой паяльной пасты; особенностей используемого оборудования, а также результатов экспериментальных паяк для каждого ПУ.

### Литература

1. Ли Н.-Ч. Технология пайки оплавлением, поиск и устранение дефектов: поверхностный монтаж, BGA, CSP и Flip-Chip технологии. М.: ИД «Технологии», 2006.
2. Семинар «Введение в технологию поверхностного монтажа», ЗАО «Предприятие ОСТЕК». М., 2006.
3. Семинар «Проблема бессвинцовых технологий производства электроники», ИД «Технологии». М., 2007.
4. IPC/JEDEC J-STD-020C Moisture/Reflow Sensitivity Classification for Non-hermetic Solid State Surface Mount Devices.