

Современные технологии. Актуальные проблемы пайки печатных узлов

Станислав Гафт, Павел Агафонов, lines@ostec-group.ru

Четыре основных метода групповой пайки печатных узлов (волной припоя, инфракрасный, конвекционный и паровоздушный) хорошо известны специалистам и до недавнего времени мирно уживались друг с другом, занимая свои ниши. Уменьшение размеров электронных компонентов, шага, размера выводов и увеличение плотности расположения их на печатной плате требуют переосмысления эффективности и областей применения для каждой технологии групповой пайки. В статье предлагается анализ современных систем оплавления для различных областей применения.

В настоящий момент системы групповой пайки являются наиболее популярными во всем мире, так как обеспечивают увеличение производительности труда при серийном производстве печатных узлов (ПУ) в десятки раз по сравнению с ручными операциями.

Основными требованиями, предъявляемыми к системам оплавления, являются:

- обеспечение высокого качества паяных соединений;
- гарантия сохранности всех компонентов печатных узлов;
- обеспечение необходимой производительности;
- минимальные (оптимальные) затраты при эксплуатации.

Для обеспечения первых двух из указанных выше требований технолог должен рассчитать необходимый температурный профиль оплавления (см. рис. 1) для каждого печатного узла. Важно отметить, что максимальная температура (точка d) определяется максимально допустимой температурой, а углы наклона (отрезки ab, cd, de) — максимально допустимыми скоростями изменения температуры на корпусе самого «капризного» к температуре компонента.

Применяемая (или планируемая к применению) на производстве система

оплавления должна обеспечить максимально точную реализацию расчетного профиля, в противном случае велика вероятность возникновения технологических дефектов паяных соединений и/или повреждения компонентов в процессе оплавления (см. рис. 2).

Применение системы с инфракрасными нагревателями в настоящий момент не целесообразно для пайки современных печатных узлов с высокой плотностью монтажа и паяными соединениями, расположенными под корпусами компонентов, из-за «теневых эффектов» и связанным с ними большим разбросом температур. Иными словами, применение систем инфракрасной пайки резко ограничено

из-за невозможности обеспечения точного попадания реальных температур в расчетное технологическое окно температурного профиля (см. рис. 3).

Применение традиционных установок пайки волной припоя для компонентов, монтируемых на поверхность печатной платы, в настоящее время также не получило достаточного распространения вследствие существенных ограничений:

- невозможно паять печатные узлы с высокой плотностью монтажа и/или компонентами с шагом выводов менее 0,5 мм из-за высокой вероятности образования «мостиков» припоя между выводами компонентов (коротких замыканий);

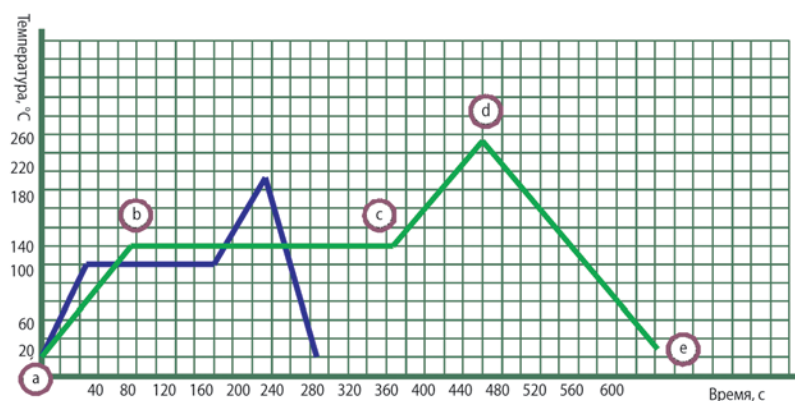


Рис. 1. Типовые температурные профили при традиционной технологии (кривая синего цвета) и бессвинцовой (кривая зеленого цвета)

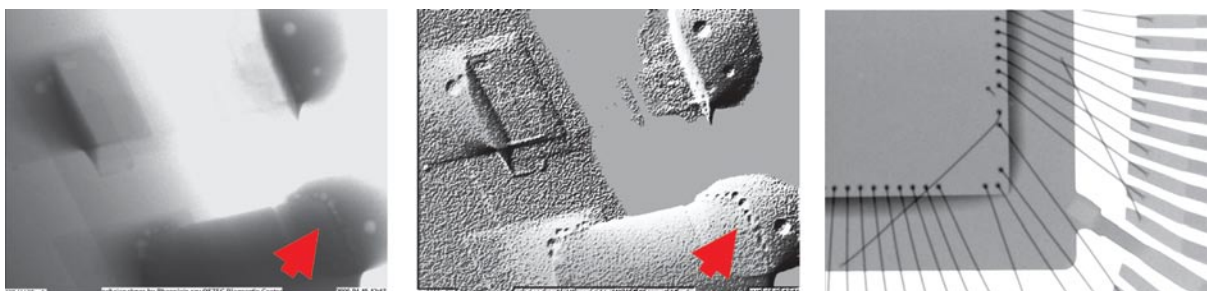


Рис. 2. Технологические дефекты паяных соединений (слева и в центре) и разрушение компонентов в процессе оплавления (справа)

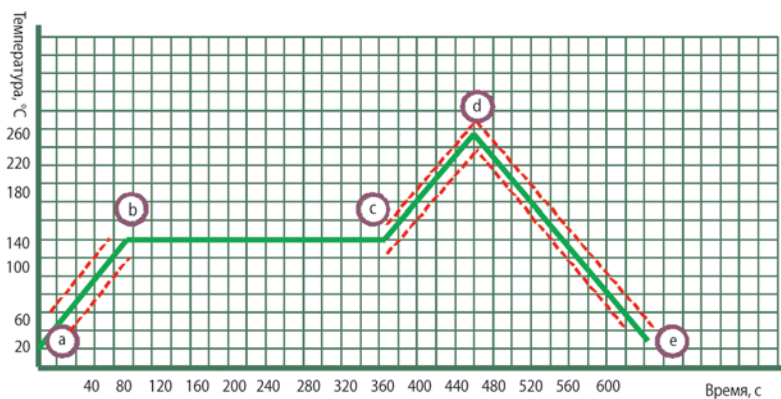


Рис. 3. Технологическое окно температурного профиля — диапазон температур, допустимый для конкретного печатного узла, обеспечивающий качество паяных соединений и сохранность электронных компонентов



Рис. 4. Отрыв (подъем) кромки (шва) контакта при волновой пайке из-за включений свинца

— необходимо расположение компонентов в корпусе QFP под углом 45°, что снижает плотность монтажа компонентов на печатной плате;

— невозможно паять печатные узлы с компонентами, контактные площадки у которых расположены под корпусом компонента.

Бессвинцовое покрытие выводов накладывает дополнительные ограничения на широкое распространение технологии пайки волной в среднесерийном производстве. Бессвинцовые припой не смачивают паяемую поверхность так эффективно, как оловянно-свинцовые эвтектические припой,

поэтому требуются большее время воздействия припоя и большая температура ванн (пайка волной припоя наиболее эффективна при 250...260°C), что неблагоприятно сказывается как на качестве пайки, так и на надежности самих электронных компонентов (см. рис. 4).

Учитывая указанные выше причины, в настоящий момент в производстве широко используются только два типа систем пайки: конвекционного оплавления и парофазной пайки, анализу и областям применения которых и посвящается данная публикация.

ТОЧНОСТЬ РЕАЛИЗАЦИИ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПРОФИЛЯ

Точность поддержания заданной пиковой температуры (точка d на рис. 3) — важнейший параметр, стабильность которого обеспечивает сохранность электронных компонентов и качество паяных соединений. Учитывая, что температура кипения является постоянной для теплоносителя определенного типа, перегрев компонентов вследствие превышения пиковой температуры при использовании парофазной пайки практически исключен.

С этим связано, на первый взгляд, совершенно обоснованное утверждение, что можно использовать один температурный профиль — не нужно проверять и отлаживать его для каждого печатного узла.

Передача тепла с помощью паров теплоносителя (плотность которых в 17 раз выше воздуха) по сравнению с конвекционным нагревом, безусловно, более эффективна. В то же время, для многослойных печатных плат с высокой плотностью монтажа и тяжелыми конструктивными элементами (металлические теплоотводы, компоненты с большими радиаторами) теплоемкости теплоносителя может не хватить. Или, по крайней мере, необходимо будет подстраивать временные параметры. Это, в свою очередь, означает, что разговоры о единственном и универсальном профиле для всех печатных узлов при использовании парофазной пайки, мягко говоря, не совсем верны. Конечно, для однотипных печатных узлов можно использовать один и тот же профиль, но ведь такая же ситуация и у мощных современных систем конвекционной пайки (см. рис. 5).

В то же самое время, запас мощности и возможности регулирования температурного профиля у современных конвекционных систем значительно шире: возможна регулировка скорости конвейера, скорости обдува вентиляторов в каждой зоне пайки, температуры нагревателей в каждой зоне пайки и т.д. А проверка и отладка необходимы, как мы видим, для систем всех типов.

Кроме того, современные системы конвекционного типа (см. рис. 6) опционально могут быть оснащены системой автоматической подготовки температурного профиля. Достаточно ввести параметры печатного узла: геометрические размеры, количество сигнальных и экранных слоев, количество компонентов — и параметры температурного профиля будут получены в течение 30 секунд.

И еще один чрезвычайно важный момент. Представим себе, что в производстве находятся (или готовятся к производству) печатные узлы с разными расчетными температурными профилями, с различной пиковой температурой:

- 213 ± 2,5°C (традиционная технология с термочувствительными компонентами);
- 222 ± 2,5°C (традиционная технология с тяжелыми конструктивными элементами);

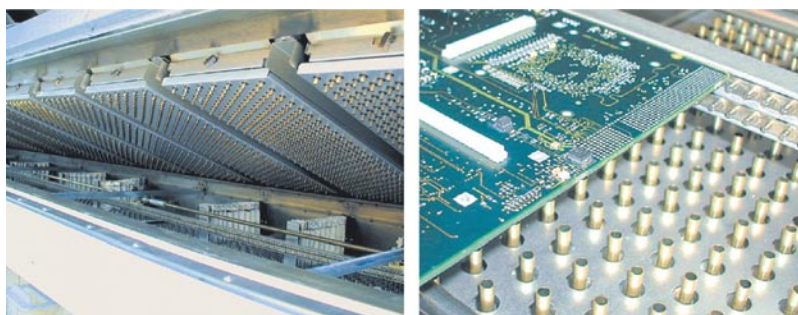


Рис. 5. Применение патентованной технологии конвекционного нагрева Multijet, в печах серии HotFlow 3 компании Ersa, Германия, обеспечивает точность реализации расчетного температурного профиля для широкой номенклатуры современных печатных узлов, гарантируя высокое качество паяных соединений и сохранность термочувствительных электронных компонентов

– 237,5 ± 2,5°C (традиционная технология для печатных узлов, содержащих компоненты с бессвинцовыми покрытиями выводов);

– 247,5 ± 2,5°C (бессвинцовая технология пайки).

Современная мощная конвекционная система оплавления (см. рис. 7) легко справляется с этой задачей. Необходимо только установка подготовленного температурного профиля. Типовое время выхода на рабочий режим — 10—30 минут.

При использовании систем парофазной пайки, кроме установки соответствующего температурного профиля, необходима замена теплоносителя. А это связано с дополнительными затратами на замену и потери дорогостоящего теплоносителя. Учитывая токсичность теплоносителя, операция по его замене не является формальной, а требует точного выполнения установленной процедуры.

ГАРАНТИЯ СОХРАННОСТИ ЭЛЕКТРОННЫХ КОМПОНЕНТОВ

При реализации температурного профиля совершенно не достаточно ограничить максимальную температуру для предотвращения повреждения электронных компонентов в процессе оплавления (см. рис. 8).

Как показывает практика, при отсутствии грубых ошибок и нарушений технологической дисциплины, проблемы сохранности термочувствительных компонентов кроются в обеспечении оптимальных скоростей нагрева и охлаждения. Так, например, по опыту автора данного материала, полученному в 1997—2003 годах на производстве, выпускающем серийную продукцию, при снижении скорости охлаждения печатного узла с 5 до 3,5°C/секунду уровень дефектности дорогих интегральных микросхем был снижен с 2,5 до 0,01%.

Анализируя характерный для современных систем парофазной пайки температурный профиль (см. рис. 9), можно увидеть, что скорости нарастания и спада температуры у них выше, чем у установок конвекционного типа.

Возможности регулирования температуры у конвекционного метода гораздо шире, так как можно оперировать несколькими переменными: температурой в зонах, скоростью вентиляторов обдува и скоростью конвейера, в то время как при парофазной пайке можно изменять только температуру

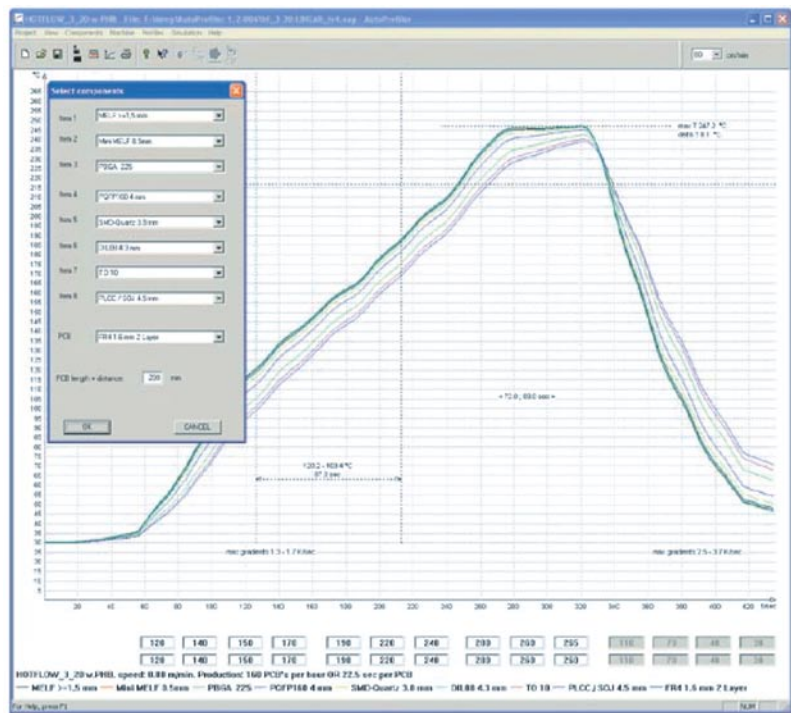


Рис. 6. Система автоматической подготовки температурного профиля для конвекционных печей оплавления Auto Profiler компании ERSA, Германия, обеспечивает расчет температурного профиля в течение 30 секунд

подогрева и время предварительного нагрева (при ограничении ее температурой кипения теплоносителя).

Кроме того, снижение скорости нагрева теплоносителя неизбежно вызовет увеличение регламентируемых параметров t_p и t_L (см. табл. 1), а для конвекционных многозонных систем (в том числе с несколькими зонами и оплавления, и охлаждения) этого можно избежать за счет регулировки скорости конвейера.

ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

В 2005—2006 годах, в преддверии выполнения директивы ЕС (об огра-

ничении на применение вредных материалов) о переходе к бессвинцовым технологиям пайки, ведущие мировые производители электроники провели серьезный анализ существующих систем пайки, так как предстояла их тотальная замена. Критерии оценки систем были следующие:

- производительность;
- точность поддержания (отклонения от заданной величины) температуры в пределах всей площади печатного узла на многослойной печатной плате максимального применяемого размера с высокой плотностью монтажа;

Таблица 1. Параметры классификационного температурного профиля, рекомендуемые стандартом IPC J-STD-020D (в соответствии с данными табл. 5–2 стандарта IPC J-STD-020D). (Все температуры измеряются на верхней поверхности корпуса компонента).

Параметры профиля	Sn-Pb	Pb-free
Скорость нарастания температуры от T_{smax} до T_p	3°C в секунду, макс.	3°C в секунду, макс.
Предварительный нагрев	T_{smin}	100°C
	T_{smax}	150°C
	Время нарастания от T_{smin} до T_{smax}	60—120 секунд
Параметры оплавления	Температура перехода T_L	183°C
	Время оплавления t_L	60—150 секунд
Максимальная температура	см. табл. 4-1	см. табл. 4-2
Время нахождения в температурном диапазоне от (T_p-5) до T_p	10—30 секунд	20—40 секунд
Скорость снижения температуры	6°C в секунду, макс.	6°C в секунду, макс.
Время нарастания температуры от 25°C до T_p	6 минут максимум	8 минут максимум



Рис. 7. Современная система конвекционного оплавления серии HotFlow 3 компании Ersa, Германия, обеспечивает необходимую производительность для производства любой серийности при гарантии повторяемости заданных параметров температурного профиля

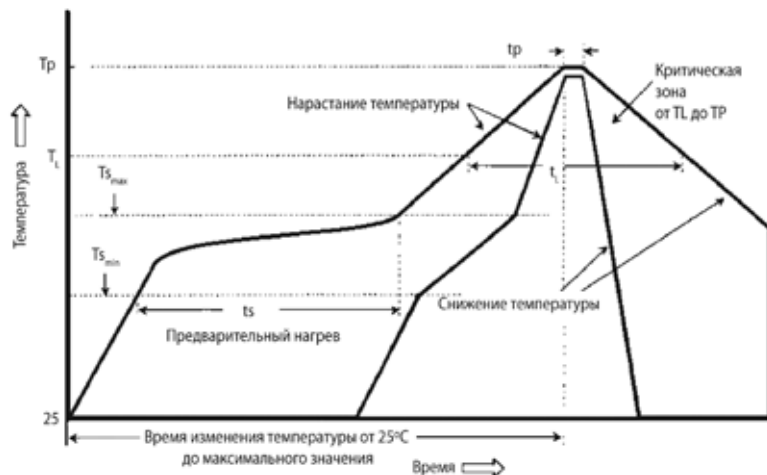


Рис. 8. Классификационный температурный профиль, рекомендуемый стандартом IPC J-STD-020D (март 2008)

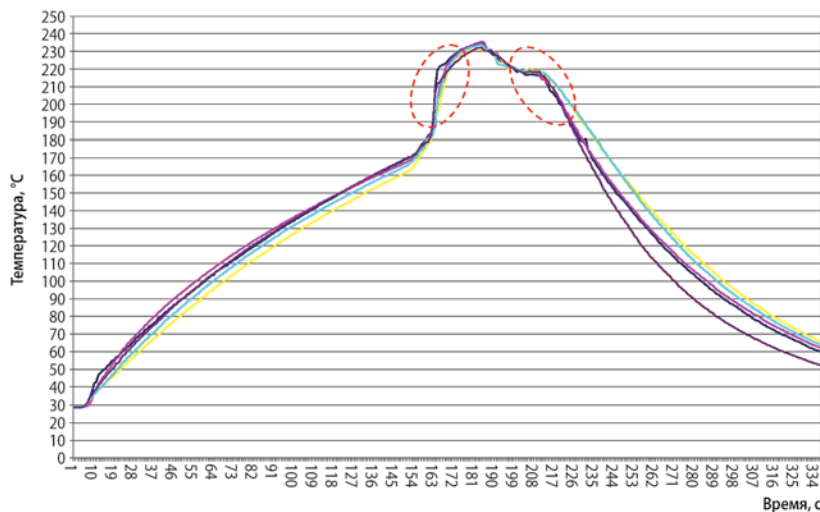


Рис. 9. Скорости изменения температур типowego температурного профиля парофазных систем выше по сравнению с конвекционными

- потребление электроэнергии;
- потребление азота (при необходимости его использования);
- стоимость процесса в час (либо в расчете на один печатный узел).

Для понимания эффективности применения установок различного типа проведем сравнение конвекци-

онных систем серии HotFlow 3 компании Ersa, Германия (см. рис. 6), и систем серии RD компании R&D Technical Service, США (см. рис. 10), для различных областей применения.

Для серийного (а тем более, массового) производства системы парофазной пайки не применяются. Столь рез-

кое ограничение имеет свои причины, лежащие в физической сути процесса парофазной пайки, которые:

- не могут обеспечить требуемых для автоматических сборочных линий коротких времен такта (типовое время — менее 40 с);
- не позволяют проводить быструю переналадку процесса при переходе на выпуск другого типа продукции (например, необходимость замены теплоносителя при переходе от традиционной пайки к бессвинцовой);
- требуют ужесточения технологической дисциплины (потери от несвоевременной замены теплоносителя при запуске новой партии изделий могут быть огромны и невосполнимы);
- высокая стоимость процесса.

Проведем расчет годовых эксплуатационных затрат для различных типов парофазных и конвекционных систем при односменном режиме работы (см. табл. 2) при следующих параметрах:

- стоимость:
 - электроэнергии за 1 кВт час = 0,1 \$;
 - сжатого воздуха за 1 м³ в час = 0,04 \$;
 - холодной воды за 1 м³ = 0,5 \$;
 - азота за 1 м³ = 0,1 \$ (при использовании генератора азота);
 - теплоносителя за 1 кг = 250 \$;
 - количество рабочих часов в год для односменного, двухсменного и непрерывного режимов работы составляет 2000, 4000 и 8000 соответственно.

Приведенные расчеты показывают, что стоимость эксплуатационных затрат для парофазной пайки значительно выше, а это означает, что и себестоимость выпускаемой продукции увеличивается. Так, например, сравнивая стоимость эксплуатационных расходов для систем оплавления, часто используемых для участков изготовления опытных образцов (модели RDL и RO 06 plus, см. табл. 2), можно легко подсчитать, что при использовании установки парофазной пайки дополнительные затраты в год составят 5400 \$. Если на этом сборочном участке в год собирается, например, 100 штук опытных образцов, себестоимость каждого из них увеличивается на 54 \$.

В этом месте опытные производственники могут возразить: «На участках изготовления опытных образцов оборудование никогда не эксплуатируется 2000 часов в год! Загрузка производства такого типа не превышает, как правило, 30...50%».

Конечно, при загрузке производства, например, на 33,3% эксплуатационные расходы, на первый взгляд, должны быть снижены втрое. При этом на каждый собранный печатный узел будет приходиться не 54, а только **18 \$** дополнительных затрат. Но необходимо понимать, что для отработки параметров температурного профиля потребуется дополнительное время. Если подходить к этому процессу ответственно и выполнять все установленные процедуры, включая снятие реальных температур печатного узла, визуальный и рентгеновский контроль качества паяных соединений для каждого нового модуля, по опыту, потребуется, по крайней мере, четыре часа. Для 100 печатных узлов в год при этом потребуется дополнительно 400 часов, что составляет 20% годового фонда рабочего времени! При этом общая загрузка оборудования оплавления возрастет с 33,3 до 53,3%, а дополнительные затраты на каждый печатный узел увеличатся, соответственно, с 18 до **28,8 \$!**

Значения эксплуатационных расходов, конечно, будут оптимизированы и уточнены в процессе работы, но на этапе выбора технологии и оборудования необходимо сделать экспертную оценку увеличения себестоимости выпускаемой продукции.

Сравним эксплуатационные расходы для систем конвекционной и парофазной пайки при использовании их в серийном производстве (см. табл. 3). Можно заметить, что при выпуске 80 000 печатных узлов в год (10 ПУ в час) себестоимость каждого повысится почти на 1 \$. При производстве недорогих изделий (бытовая, автомобильная электроника) такое увеличение себестоимости может быть решающим фактором при определении рентабельности выпускаемой продукции и причиной для отказа от включения ее в план производства.

Проведенный анализ позволяет сделать выводы об областях эффективного применения систем различных типов.

Область эффективного использования систем парофазной пайки — производство опытных образцов и уникальной продукции ответственного применения со следующими ограничениями:

- при условии выполнения разработчиками и конструкторами жестких требований по применению компонентов, позволяющих работать с одним температурным профи-



Рис. 10. Модельный ряд систем парофазной пайки серии RD компании R&D Technical Service, США

Таблица 2. Расчет годовых эксплуатационных затрат для различных типов парофазных и конвекционных систем при односменном режиме работы

Потребляемый ресурс	RDL	RO 06 plus	RD2	RO 400 FC	RD52	Hotflow 2/12
Среднее энергопотребление, кВт	5,5	3,5	23	8	30	38
Затраты на электроэнергию в год, \$	1100	700	4600	1600	6000	7600
Потребление сжатого воздуха, м ³ /час	—	—	—	—	5	—
Затраты на сжатый воздух в год, \$	—	—	—	—	400	—
Потребление воды, м ³ /час,	—	—	0,6	—	1,2	—
Затраты на холодную воду в год, \$	—	—	600	—	1200	—
Потребление азота, м ³ /час	—	—	—	—	—	30
Затраты на азот в год, \$	—	—	—	—	—	6000
Расход теплоносителя, г/час	10	—	20	—	50	—
Затраты на теплоноситель в год, \$	5000	—	10000	—	25000	—
Итоговые затраты в год, \$	6100	700	15200	1600	32600	13600

Таблица 3. Сравнительный расчет годовых эксплуатационных затрат для парофазной и конвекционной систем оплавления при различных режимах работы

Потребляемый ресурс	RD52	Hotflow 2/12	RD52	Hotflow 2/12	RD52	Hotflow 2/12
	односменный		двухсменный		непрерывный цикл	
Среднее энергопотребление, кВт	30	38	30	38	30	38
Затраты на электроэнергию в год, \$	6000	7600	12000	15200	24000	30400
Потребление сжатого воздуха, м ³ /час	5	—	5	—	5	—
Затраты на сжатый воздух в год, \$	400	—	800	—	1600	—
Потребление воды, м ³ /час,	1,2	—	1,2	—	1,2	—
Затраты на холодную воду в год, \$	1200	—	2400	—	4800	—
Потребление азота, м ³ /час	—	30	—	30	—	30
Затраты на азот в год, \$	—	6000	—	12000	—	24000
Расход теплоносителя, г/час	50	—	50	—	50	—
Затраты на теплоноситель в год, \$	25000	—	50000	—	100000	—
Итоговые затраты в год, \$	32600	13600	65200	27200	130400	54400

лем и исключая замену теплоносителя;

- при условии ограниченной номенклатуры (с точки зрения сложности и насыщенности теплоемкими конструктивными элементами) выпускаемых печатных узлов;

- при условии выпуска дорогостоящей продукции, допускающей увеличение стоимости процесса (и себестоимости), по крайней мере, на **5...10 \$** на один печатный узел;

- для производств, не требующих высокого уровня автоматизации технологических процессов;

- при ограничении площадей для размещения оборудования;

- при отсутствии перспектив развития производства (увеличение объ-

ема собственной продукции и /или контрактного производства);

- при обеспечении высокого уровня технологической дисциплины.

Область использования систем конвекционной пайки — все типы производств от изготовления опытных образцов до массового производства. Ограничение на применение: корректный выбор модели (моделей) в зависимости от требований на выпускаемую продукцию, включенную в план производства, и перспективную, находящуюся в разработке. Именно благодаря универсальности системами конвекционного типа оснащается подавляющее количество производств во всем мире.