

Характеристики паяльных паст: что нужно знать?

Технология поверхностного монтажа весьма сложна, на качество пайки электронных модулей влияет множество различных факторов. Так, надежность конечного изделия сильно зависит от качества используемой паяльной пасты. Статистика показывает, что до 64% дефектов возникает еще до поступления печатных плат в установщик компонентов.

Эли Вестерлакен
(Eli Westerlaken)
Перевод: Ольга Зотова

OlgaZotova@dipaul.ru

Подавляющее большинство дефектов (рис. 1) возникает на этапе нанесения паяльной пасты. Например, может произойти разбрызгивание припоя и образование его шариков вокруг компонентов, а расслоение флюса обычно приводит к проблемам в работе печатных голов закрытого типа в трафаретных принтерах.

Введение

Это значит, что характеристикам используемой паяльной пасты и самому процессу нанесения необходимо уделять больше внимания.

При использовании закрытой головы, при работе с компонентами с ультрамалым шагом выводов и высокой скорости нанесения паяльной пасты, при стремлении добиться ее бездефектного нанесения и при использовании бессвинцовых паяльных паст необходимо понимать, как поведет себя материал. Характеристики пасты необходимо изучать, начиная со стадии производства и далее — на этапах перевозки, хранения, во время нахождения на трафарете и затем на печатной плате до момента ее попадания в установщик компонентов. Обычно паяльная паста демонстрирует стабильность во время перевозки, чувствительность к температуре во время нанесения, различное «поведение» в зависимости от скорости нанесения, разное время сохранения свойств на трафарете (при нанесении с помощью ракелей) и неодинаковые свойства клейкости.

На сам же процесс нанесения влияет множество факторов. На рис. 2 показана вся сложность этого этапа технологического процесса. Очевидно, необходимо удостовериться, что ключевое звено технологического процесса не меняет характеристики паяльной пасты в худшую сторону. Если поставлена задача повысить процент выпуска годной продукции, то необходимо следить за вязкостью, прочностью на сдвиг и продолжительностью сохранения свойств на трафарете.

Хорошая паяльная паста — это не просто смесь припоя, флюса и добавок, формирующих реологические свойства пасты. Не менее важно рассматривать совокупность (взаимодействие) химических и физических характеристик материалов: небольшие различия в составе веществ, особенности окружающей среды (например, температура, влажность) и условия технологического процесса могут существенно повлиять на «поведение» паяльной пасты.

На рис. 3 схематически показано влияние характеристик паяльной пасты на качество конечного изделия. Это упрощенная схема, демонстрирующая лишь некоторые взаимосвязанные факторы. На самом же деле такие взаимосвязи есть между всеми составляющими. Например, скорость окисления порошка во многом определяется размером и формой его частиц.

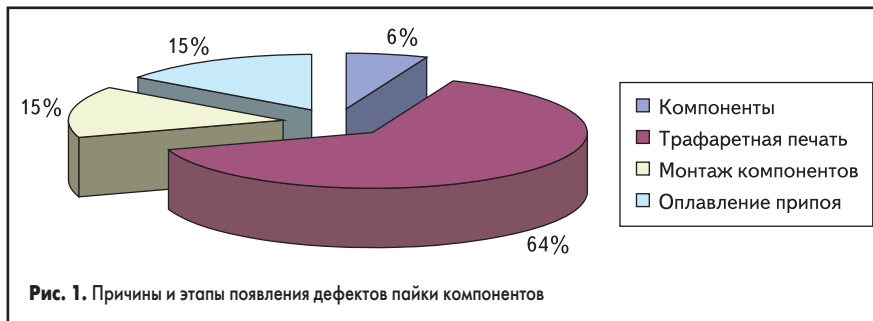


Рис. 1. Причины и этапы появления дефектов пайки компонентов

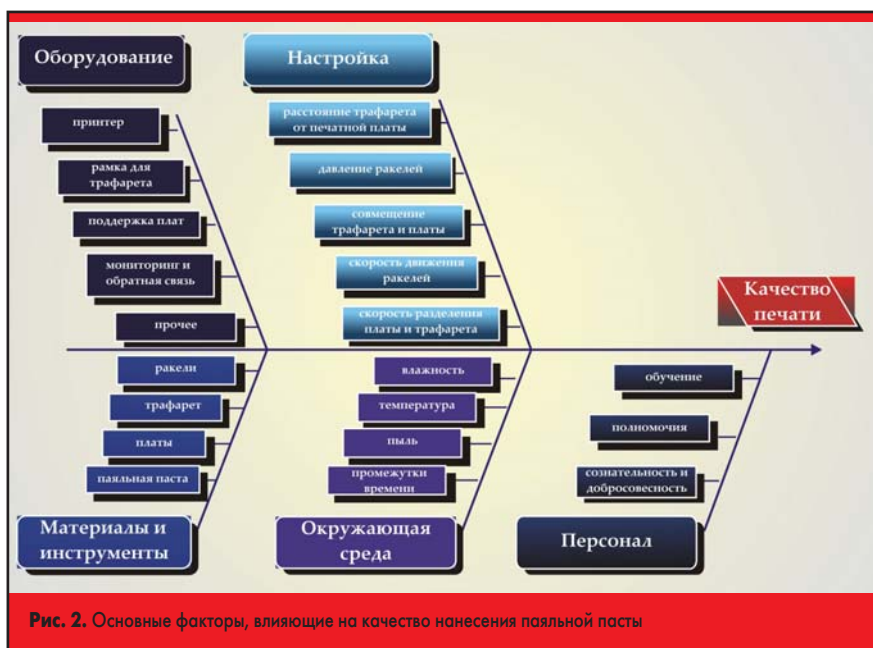
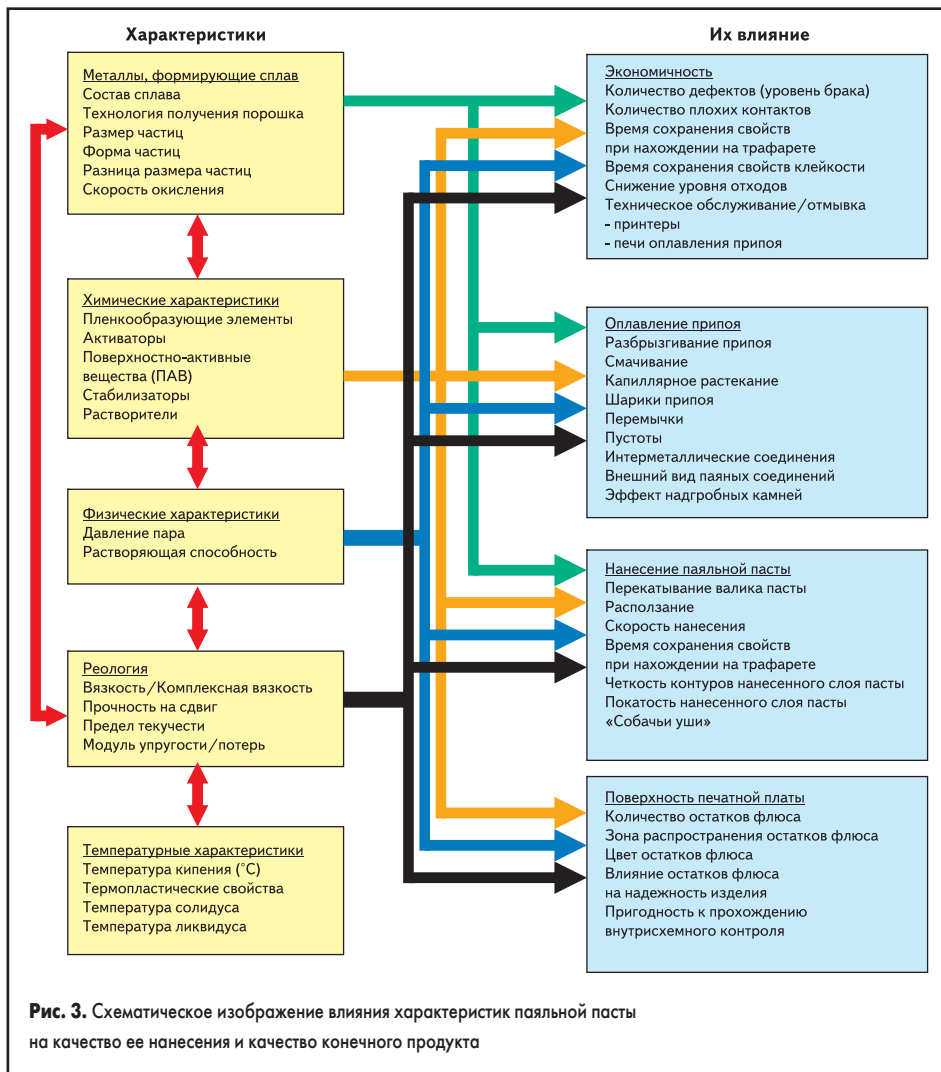


Рис. 2. Основные факторы, влияющие на качество нанесения паяльной пасты

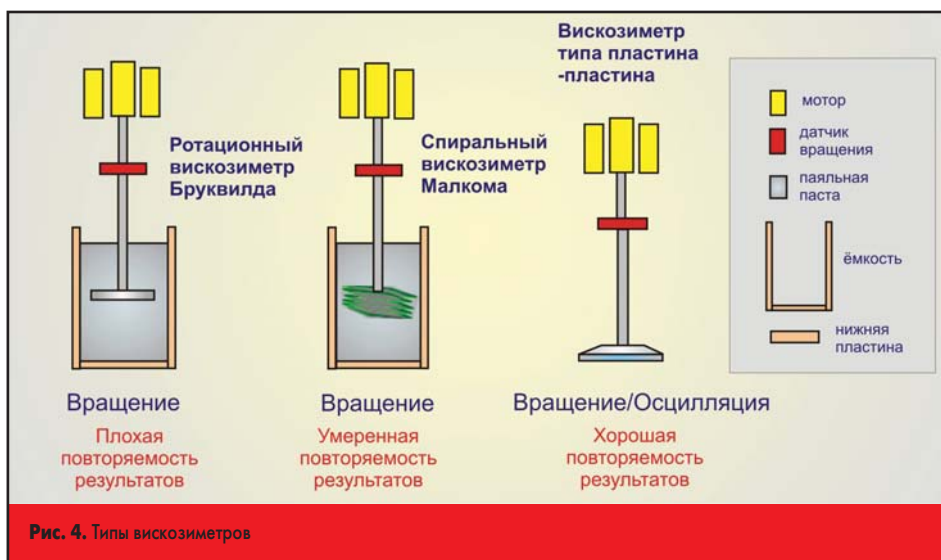


Характеристики, связанные с чувствительностью паяльной пасты к температуре, качеством нанесения при различной скорости, продолжительностью сохранения свойств на трафарете, вязкостью можно объяснить с точки зрения свойств текучести и деформации паяльной пасты.

Реология паяльной пасты

Реология — это наука, которая занимается изучением характеристик текучести и де-

формации вещества. Касательно паяльных паст важно изучение этих качеств при воздействии атмосферного давления, вибрации ремней конвейерной системы (расположение) и сил, связанных с процессом нанесения паяльной пасты (перекатывание валика пасты). Различные силы, воздействующие на материал, — это сила скорости сдвига и сила касательного напряжения сдвига. Кроме сил сдвига, деформации и текучести паяльной пасты, а также скорости восстановления ее свойств, важны время и температура.



Таким образом, вопрос изучения поведения паяльной пасты обычно упрощался, и во внимание принимались такие характеристики, как вязкость в одной точке или кривая вязкости. Вязкость — это сопротивление ньютоновскому течению. В зависимости от уровня сложности, оборудование, используемое для определения реологических характеристик, может определить вязкость паяльной пасты за счет высчитывания вязкости в одной точке и предела текучести и построения кривой вязкости.

В ротационном вискозиметре Бруквилда очень маленькая площадь поверхности. Это одна из причин, по которым повторяемость результатов измерений существенно ограничена. Спиральный вискозиметр Малкома отличается умеренной повторяемостью получаемых измерений. В вискозиметрах типа пластина-пластина точность выше, а значит, больше возможностей проверять воздействие осцилляции, суперпозиции температур и т. д. Различные типы вискозиметров можно видеть на рис. 4.

Сейчас особенно популярны спиральные вискозиметры. Они завоевали репутацию оборудования, позволяющего получить более точные показания. Все типы прошли сертификацию на получение большинства международных стандартов. Более сложное оборудование типа пластина-пластина должно использоваться гораздо более квалифицированным персоналом в лабораторных условиях. Это оборудование позволяет точно определить характеристики вязкости паяльной пасты. Его модульный дизайн обычно позволяет наращивать возможности отслеживания различных реологических параметров, некоторые из которых относятся сугубо к действию осцилляции.

Сравним данные вязкости в одной точке. Таблица показывает, что данные, полученные с помощью разного оборудования, практически несравнимы.

Таблица. Вязкость паяльной пасты в Па • с

Система	Вискозиметр Малкома, контролируемая скорость сдвига при 6 с ⁻¹	Вискозиметр Паар-Физика UDS-200, контролируемое касательное напряжение сдвига, данные получены при 6 с ⁻¹
325-RXM	177	188
325-RX	225	177
325-XM2	231	254

Интересен параметр, относящийся к появившейся не так давно области реологии, — определение коэффициента вязкости и эластичности вещества. Его мы обсудим в соответствующем разделе «Характеристики вязкости и эластичности».

Сегодня вязкость измеряется при произвольно выбираемых низких показателях скорости сдвига. Даже в большинстве международных стандартов, относящихся к паяльным пастам, термин «вязкость» используется только для характеристики процесса нанесения. Но чтобы воспроизвести параметры текучести

паяльной пасты во время хранения и нанесения, нужен более основательный подход.

Профиль вязкости строится по двум параметрам: кривая вязкости относительно кривой скорости сдвига. Уравнение для так называемого индекса тиксотропности (ТИ) выглядит следующим образом:

$$TI = \log \frac{\eta(D = 1,85)}{\eta(D = 1,85)}$$

где η — вязкость (Па·с); D — скорость сдвига (c^{-1}).

График индекса тиксотропности (ТИ) паяльной пасты, построенный на основании показаний, полученных с помощью вискозиметра типа пластина-пластина, приведен на рис. 5. Хотя этот тест и дает больше результатов, чем при использовании спирального вискозиметра, тем не менее, данные все равно весьма ограничены.

Роль температуры

Обычно поставщики паяльных паст называют покупателям допустимый диапазон рабочих температур для своей продукции. Важность этих рекомендаций можно понять, изучив приведенный ниже график. Он построен на основе данных, полученных в ходе проверки разброса показателей осцилляции при неизменяемых настройках очень низких амплитуды и частоты колебаний. Измеряются следующие показатели: модуль упругости (G'), модуль потерь (G'') и $tg \delta$. С помощью этих измерений можно четко показать, что температура паяльной пасты в 18 °С слишком низкая, так как значения параметров G' и G'' при температуре ниже 22 °С слишком высокие. Кроме того, неверно их соотношение ($tg \delta$). При температуре выше 26 °С эти параметры достигают таких значений, которые следует избегать.

Результаты тестирования свойств паяльной пасты 325-ХМ2, полученные в состоянии ее «покоя», показывают, что показатель эластичности доминирует во всем температурном диапазоне (рис. 6). Кроме того, оба показателя G' и G'' выше соответствующих показателей паяльной пасты 325-RXM. Для этих паяльных паст оптимальное температурное окно находится в пределах 22...26 °С.

Характеристики вязкости и эластичности

С точки зрения реологии паяльную пасту можно классифицировать как «вязкоэластичную жидкость». Характеристики вязкости определяются модулем потерь (G''), а характеристики эластичности — модулем упругости (G'). Очень важно соотношение этих двух показателей. Оно рассчитывается как частное от деления G'' на G' и называется коэффициентом затухания ($tg \delta$).

Во время хранения, перевозки и после нанесения паяльной пасты характеристики эластичности (модуль упругости) наиболее важны. Поэтому значение $tg \delta$ должно быть < 1 в пределах определенных максимальных

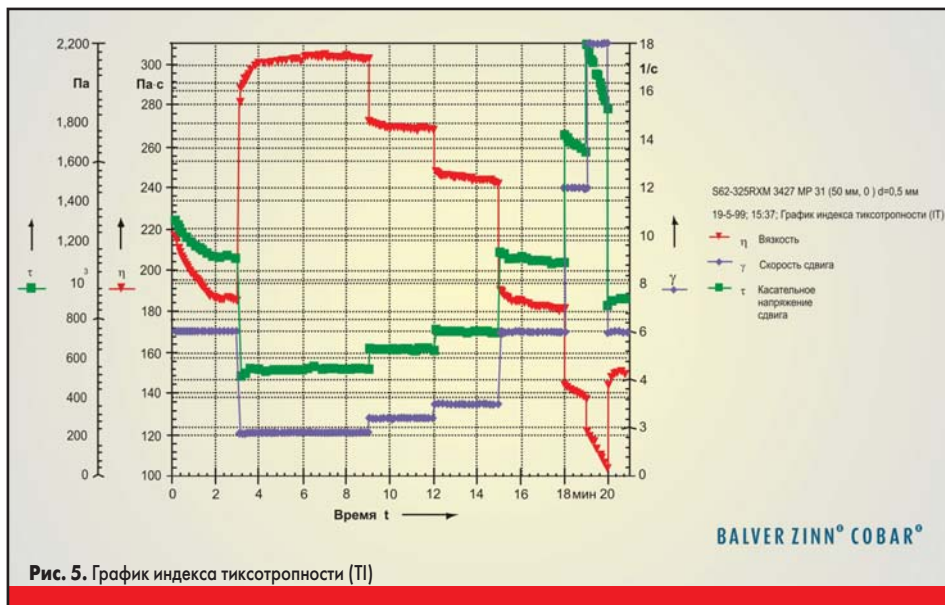


Рис. 5. График индекса тиксотропности (ТИ)

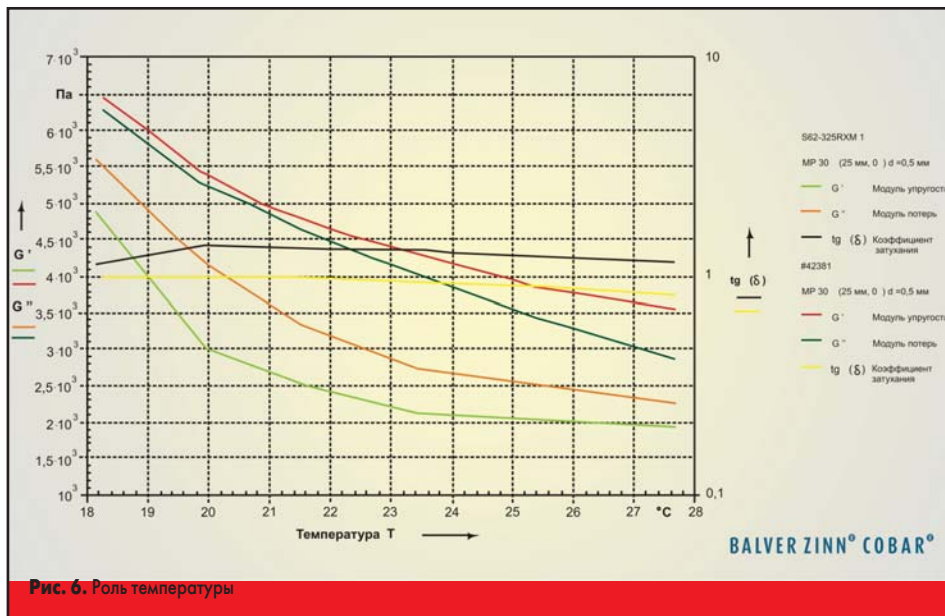


Рис. 6. Роль температуры

и минимальных значений. Точное значение коэффициента эластичности паяльной пасты можно определить только лишь с помощью сложного оборудования, учитывающего показателя осцилляции.

Высокое значение G' обычно означает, что у вещества высокая сопротивляемость к расслоению и растеканию. Недостатком слишком высокого значения G' является возможность налипания пасты на ракелях, ограничение скорости

нанесения пасты (движения ракелей), формирование покатых слоев и «собачих ушей».

Так, например, медленно стекающее со шпателя желеобразное вещество настолько упругое, что его можно резать (рис. 7). Этот опыт наглядно демонстрирует характеристики вязкости и упругости вещества.

Возможно, читателю уже стало понятно, что определение только одного параметра, например, вязкости паяльной пасты, простым прибором с вращающимся механизмом уже не соответствует современным требованиям технологии поверхностного монтажа.

Формируемые цепочки элементов и суперструктуры

Флюсоующая составляющая в паяльной пасте состоит из нескольких функциональных групп, например, канифоль и добавки, влияющие на реологию и другие свойства паяльной пасты. Эти вещества формируют короткие и длинные цепочки из линейных и даже разветвленных молекул. Некоторые из этих веществ полностью растворяются в системе растворителей, а другие разбухают и формируют коллоидные структу-

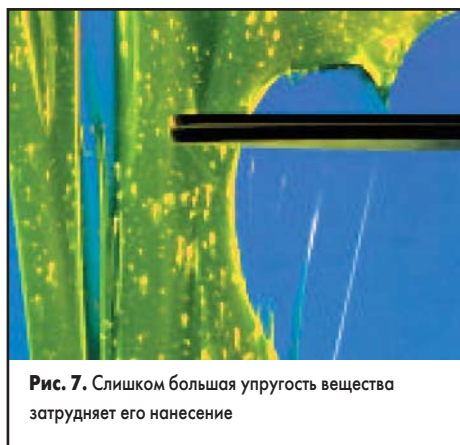


Рис. 7. Слишком большая упругость вещества затрудняет его нанесение

свойства эластичности паяльной пасты сохраняются. Паста ведет себя как твердое вещество. Она не деформируется, то есть не расслаивается и не расплывается. Традиционно предел текучести определялся в ротационных вискозиметрах в режиме контролируемого касательного напряжения сдвига (CSS). Чем выше значение предела текучести, тем прочнее суперструктура и слабее тенденция к расслоению. Чем прочнее встроились частицы припоя в суперструктуру флюса, тем выше стабильность паяльной пасты. Чувствительность устройства измерения — важнейший параметр при проведении такого способа определения предела текучести. На практике можно сказать, что чем выше чувствительность вискозиметра, тем ниже будет значение предела текучести.

У паяльной пасты 325-ХМ2 (компания Balver Zinn/Cobar) предел текучести существенно выше, чем у паст 325-RXM и 325-RX, поэтому она менее склонна к расслоению (рис. 8).

Модуль упругости (G')

Вискозиметр в режиме осцилляции позволяет проверить так называемый параметр разброса показателей осцилляции. При постоянной частоте в пределах 1 Гц образец подвергается воздействию ослабевающих по силе колебаний. В области с самой маленькой силой колебаний график входит в зону, относящуюся к свойствам вязкости и эластичности. Ровность этой зоны говорит о том, что суперструктура паяльной пасты достаточно прочна к воздействию минимальных нагрузок (растяжение, деформация) в этом диапазоне. То есть вещество не течет, а находится в состоянии покоя. Чем выше значение G' в этом диапазоне и чем длиннее этот диапазон, тем прочнее суперструктура. В этом случае также можно сказать, что в этом диапазоне паста обладает максимальной сопротивляемостью к расслоению и расплыванию. С помощью сложного программного обеспечения, используя этот способ, можно высчитать предел текучести.

Этот опыт дает больше информации о силе суперструктуры. Спад кривой эластичности (G') после значения силы растяжения в 0,0001 (d) позволяет определить предел текучести (рис. 9).

Нулевая вязкость

С помощью вискозиметра, работающего в режиме осцилляции, с учетом разброса значений частоты при постоянно малой амплитуде и частоте колебаний в нижнем диапазоне, можно провести тест на определение комплексной вязкости (η^*) в состоянии покоя. Чем выше нулевая вязкость, тем выше сопротивление паяльной пасты к расслоению.

У паяльной пасты 325-ХМ2 нулевая вязкость существенно выше, чем у пасты 325-RXM, поэтому она менее склонна к расслоению и расплыванию (рис. 10).

Свойства нанесения паяльной пасты

В идеальной ситуации у нанесенного слоя паяльной пасты прямоугольной, круглой или овальной формы до оплавления четко выражены контуры. Обычно ракель одним движением снимают паяльную пасту с верх-

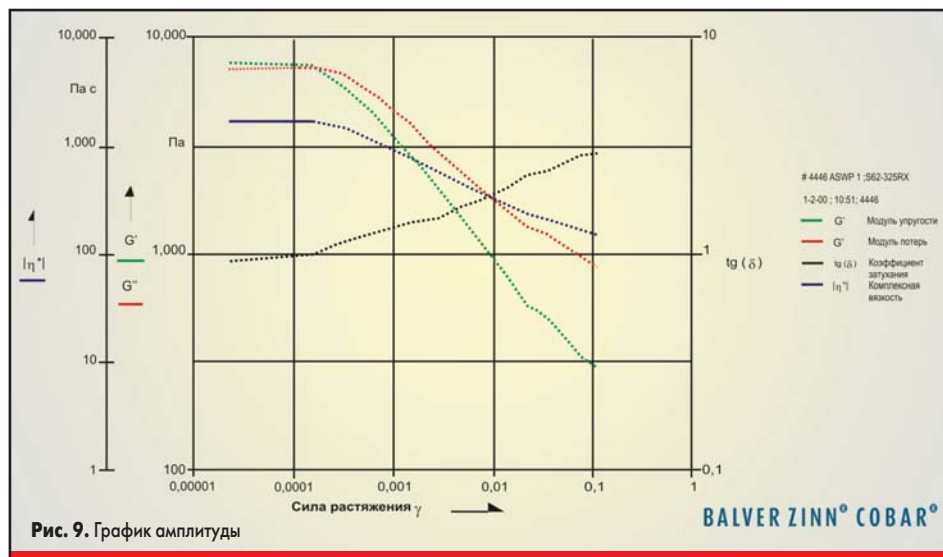


Рис. 9. График амплитуды

ней стороны трафарета, оставляя слои с четко выраженными контурами на печатной плате. Свойства нанесения паяльной пасты зависят от ее реологических свойств.

Сегодня используются компоненты с мелким шагом выводов, выросли требования к скорости нанесения паяльной пасты и все чаще используются закрытые головы печати в трафаретных принтерах. Поэтому нам кажется необходимым более основательно подойти к изучению вопроса влияния сил сдвига на паяльную пасту во время процесса нанесения. Ключевыми моментами становятся: удаление следов с поверхности трафарета, равномерное заполнение апертур трафарета и быстрое восстановление суперструктуры в нанесенном на печатную плату слое паяльной пасты. Самые распространенные в настоящее время дефекты, возникающие в процессе нанесения паяльной пасты, — это недостаточно выраженная четкость контуров нанесенного слоя паяльной пасты, покатошь слоя в одну сторону, «собачьи уши». Поэтому эти дефекты нужно рассмотреть с точки зрения реологии. Труднее всего нанести паяльную пасту через апертуры трафарета для контактных площадок таких компонентов, как QFP с шагом выводов 0,4 мм и меньше, расположенных перпендикулярно направлению движения ракелей, двигающихся со скоростью свыше 30 мм/с. При производстве

мобильных телефонов обычная скорость движения ракелей составляет 100 мм/с и более.

Для понимания поведения паяльной пасты при ее нанесении нельзя игнорировать тот факт, что апертуры трафарета заполняются, так сказать, по обратной траектории. Высокоскоростная видеосъемка четко показывает, что после пересечения края апертуры паяльная паста не сразу заполняет апертуру, поскольку кроме вертикального движения пасты есть еще и горизонтальное движение, причем, достаточно быстрое. Паяльная паста в апертуре свободно движется, практически без сдвига, по горизонтали слегка вниз до тех пор, пока не «ударится» о противоположную стенку апертуры. В результате этого часть паяльной пасты упадет вниз и будет заполнять апертуру, двигаясь в обратную сторону, до тех пор, пока не будет срезана лезвием ракеля или закрытой печатной головкой. Скорость заполнения апертуры во время нанесения паяльной пасты можно высчитать по следующей формуле:

$$V = \frac{\left(A - \left(\frac{100 - R}{100} \right) \right) \left(\frac{100 - B}{100} \right)}{V_p}$$

где V_p — скорость печати, м/с; A — ширина апертуры, м; R — сужение апертуры, %; B — обратное движение, %.

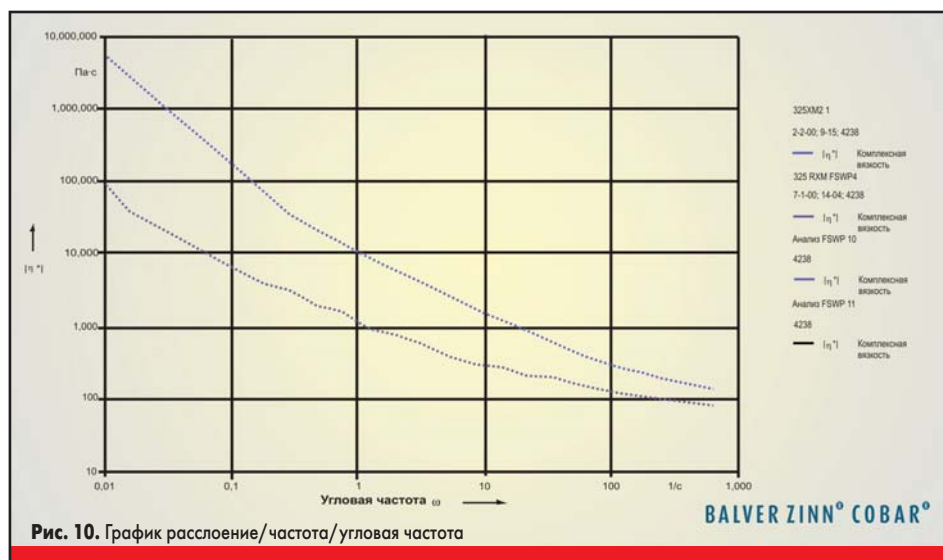


Рис. 10. График расслоение/частота/угловая частота

В случае нанесения паяльной пасты в апертуру трафарета для компонента QFP с шагом выводов 0,4 мм, расположенных перпендикулярно движению ракеля, движущегося со скоростью 100 мм/с, получается следующий результат:

$$V = 0,0002$$

$$\frac{\left(\frac{100-10}{100}\right)\left(\frac{100-30}{100}\right)}{0,1} = 0,00126 \text{ м/с.}$$

Если говорить о скорости сдвига, то применяется следующее уравнение:

$$D = V/d,$$

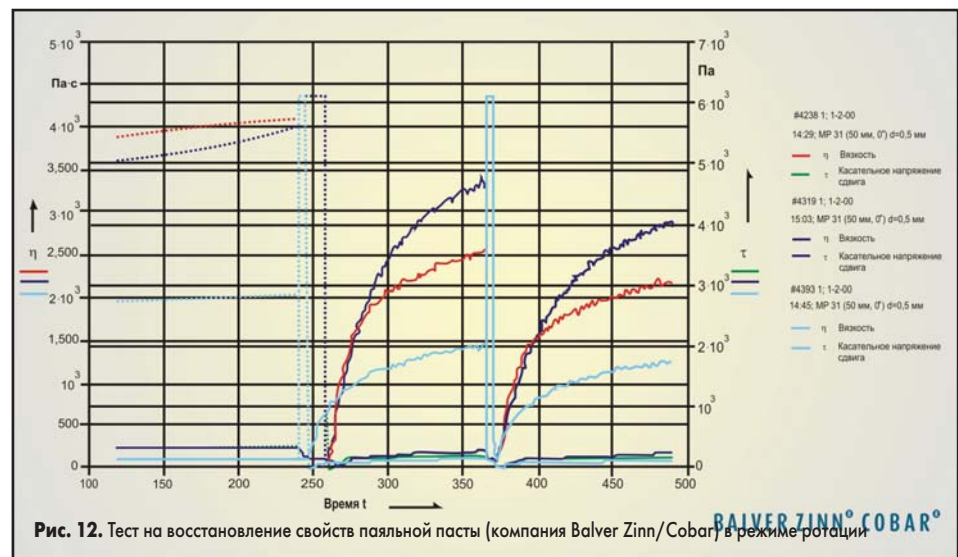
где d — это диаметр самой большой частицы порошка. Если взять диаметр 50 микрон, то D равняется $25,2 \text{ с}^{-1}$.

Как сказано ранее, частота должна оставлять порядка 800 Гц. В процессе подготовки этого опыта мы, тем не менее, обнаружили, что при значениях выше 500 Гц существенных отличий не наблюдается. Сегодня в самых хороших вискозиметрах максимальная частота осцилляции составляет 100 Гц. Тем не менее, следует осторожно использовать такие высокие значения. С помощью суперпозиции температур можно воспроизвести достаточно более высокие частоты, которые могут возникнуть во время заполнения апертур паяльной пастой.

Во время заполнения апертур, характеристики вязкости паяльной пасты имеют первоочередное значение. Вязкость должна мгновенно понизиться настолько, насколько это возможно. Это значит, что необходимо снижение значений G' и G'' , причем G'' должно стать выше значения G' . Следовательно, коэффициент затухания ($\text{tg } \delta$) должен составлять > 1 , а комплексная вязкость (η^*) — стать как можно ниже.

После заполнения апертуры суперструктура должна немедленно восстановиться. Это значит, что G' и G'' должны мгновенно вырасти, причем G' должно как можно быстрее стать больше значения G'' . Коэффициент затухания ($\text{tg } \delta$) должен как можно быстрее вернуться к первоначальному значению (ниже 1), а комплексная вязкость (η^*) — как можно быстрее увеличиться.

Все эти условия выявляются при проведении измерения параметров ползучести, известном как испытание на восстановление свойств, или тест на тиксотропность. В первой фазе на паяльную пасту сильно действуют силы сдвига, поэтому суперструктура полностью разрушается. Продолжительность этой фазы составляет 3 с. Это гораздо дольше промежутка времени, необходимого для того, чтобы паста заполнила апертуру. Но 3 с необходимы устройству для того, чтобы получить несколько точек измерений. Фаза восстановления свойств составляет 2,5 мин. Это также дольше, чем пауза после завершения цикла печати в реальных производственных условиях. Тем не менее, чтобы получить хорошие данные о разнице в свойствах восстановления суперструктур



паяльной пасты с минимальными различиями в их химическом составе, рекомендуется задавать фазу восстановления именно такой продолжительности. Проведенные в наших лабораториях опыты показали, что при повторяющихся фазах нагрузки, чередующихся с фазами восстановления свойств, существенных различий не обнаружено.

В режиме вращения, в первой фазе, на паяльную пасту действует высокая сила скорости сдвига. Тест на восстановление свойств в режиме вращения дает информацию только о вязкости.

Режим ротации

Рассмотрим тест на восстановление в режиме ротации (рис. 11). В первой фазе паяльная паста находится в состоянии покоя, так как на нее действует сверхнизкая скорость сдвига. Вторая фаза — это фаза действия на пасту различных сил в течение 3 с. В этой фазе воспроизводятся условия нанесения паяльной пасты принтером с высокой скоростью. Вязкость пасты падает. Третья фаза — это первая фаза восстановления свойств пасты. Здесь воспроизводятся условия паузы после завершения движения ракелей. Тем не менее, пауза в ходе опыта длительнее, чем реальная пауза в принтере (2,5 мин). Это позволяет вискозиметру зафиксировать восстановление пастой свойств. Фазы 4 и 5 — это повторение фазы действия различных сил на пасту и фазы восстановления свойств. Опыты с большим количеством фаз не выявили других существенных данных. В фазе восстановления ни одна из паст, принявших участие в испытаниях, не показала полное восстановление реологических свойств, наблюдавшихся в состоянии покоя. Паяльная паста 325-ХМ2 (красная кривая на рис. 11) восстанавливает свойства быстрее, чем это необходимо для равномерного заполнения апертуры. Паяльная паста 325-РХМ (голубая кривая на рис. 11) недостаточно быстро восстанавливает свойства, а ее структура не обладает достаточной силой для использования в закрытых головах печати в трафаретных принтерах. У паяльной пасты 325-РХ (синяя кривая на рис. 11) ограничена скорость нанесения. В фазе восстановления ее вязкость слишком большая.

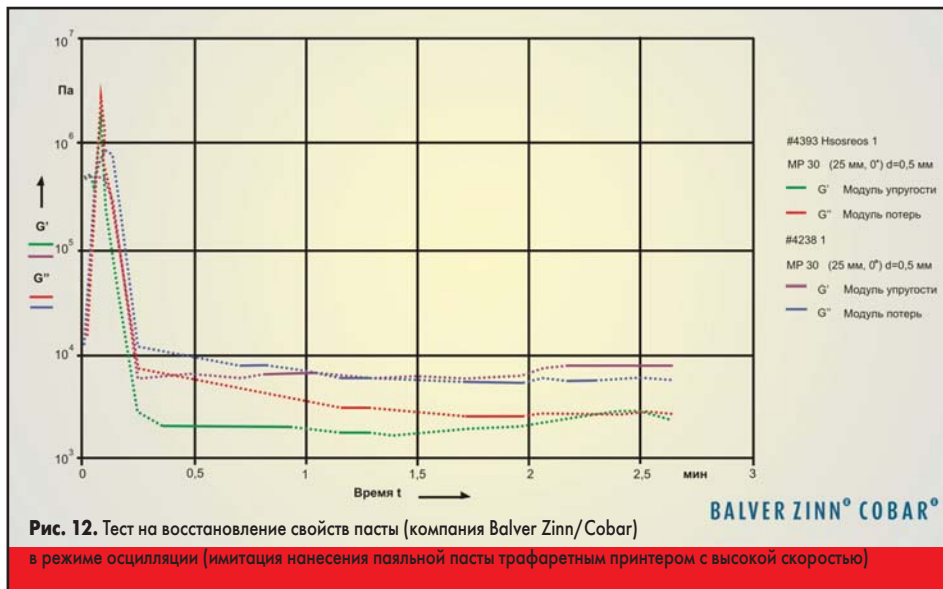
Режим осцилляции

Тест на восстановление свойств в режиме осцилляции дает информацию об изменениях значений G' , G'' и опционально значения $\text{tg } \delta$ и комплексной вязкости (рис. 12).

В первой фазе на паяльную пасту действует сила самой высокой частоты и амплитуды колебаний, а также суперпозиция температур, что приводит к полному разрушению суперструктуры, подобно тому, как разрушается суперструктура паяльной пасты при заполнении апертуры трафарета в направлении, обратном движению ракелей. В ходе опыта используются высокая частота (>500 Гц) и суперпозиция температур. Длительность этой фазы — 3 с. С помощью мощного устройства, работающего на электротермическом эффекте Пельтье, температура восстанавливается до отметки $25 \text{ }^\circ\text{C}$ в течение считанных секунд.

Во второй фазе у пасты есть возможность восстановить свои свойства, пока температура в течение нескольких секунд возвращается к отметке $25 \text{ }^\circ\text{C}$, а указанные выше значения фиксируются в то время, пока на пасту действуют самые низкие из возможных амплитуда и частота колебаний. В фазе восстановления (2,5 мин) отслеживаются свойства эластичности и вязкости (G''). Этот график четко показывает, что паяльная паста 325-ХМ2 (фиолетовая кривая для G' и голубая кривая для G'' на рис. 12) во время нанесения перекатывается лучше. Значения обоих параметров G' и G'' ниже, как и в случае с пастой 325-РХМ (зеленая кривая для G' и красная кривая для G'' на рис. 12). Кроме того, четко видно, что параметр G'' (вязкость) доминирует. У паяльной пасты 325-РХМ оба параметра — G' и G'' — выше при воздействии ракелей, движущихся с высокой скоростью, в первой фазе, поэтому сопротивляемость к перемещению значительно выше. В фазе восстановления, чтобы параметр G' стал больше параметра G'' , нужно очень много времени. У пасты 325-ХМ2 оба параметра восстанавливаются гораздо быстрее, и параметр G' вырастает больше параметра G'' тоже гораздо быстрее. Поэтому данная паста менее чувствительна к расположению.

У той паяльной пасты, которая демонстрирует быстрое восстановление свойств во



второй фазе, самая низкая тенденция к расползанию и подтеканию. С другой стороны, у паяльной пасты с относительно высоким значением G' в первой фазе могут быть следующие дефекты: неоднородность нанесения, покатошь нанесенного слоя и «собачьи уши». В ходе проведения работ в наших лабораториях стало очевидным то, что самое важное значение имеет баланс свойств вязкости и эластичности.

Заключение

Чтобы повысить качество нанесения паяльной пасты, необходимо уделить большое внимание ее реологическим свойствам. В данной статье описано несколько различных способов их определения. Новые методики и сбор статистических данных приведут к выработке на предприятии нового надежного способа выбора паяльной пасты.