

# 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

## Введение

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 головок закрытого типа в трафаретных принтерах. Это значит, что харак-

теристикам 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 деле такие взаимосвязи есть между всеми состав-

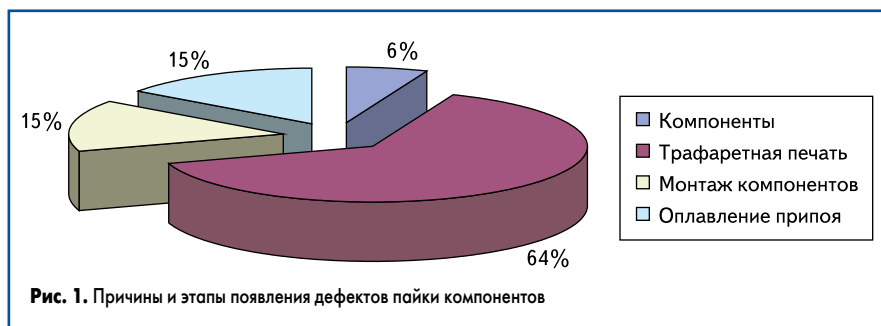


Рис. 1. Причины и этапы появления дефектов пайки компонентов

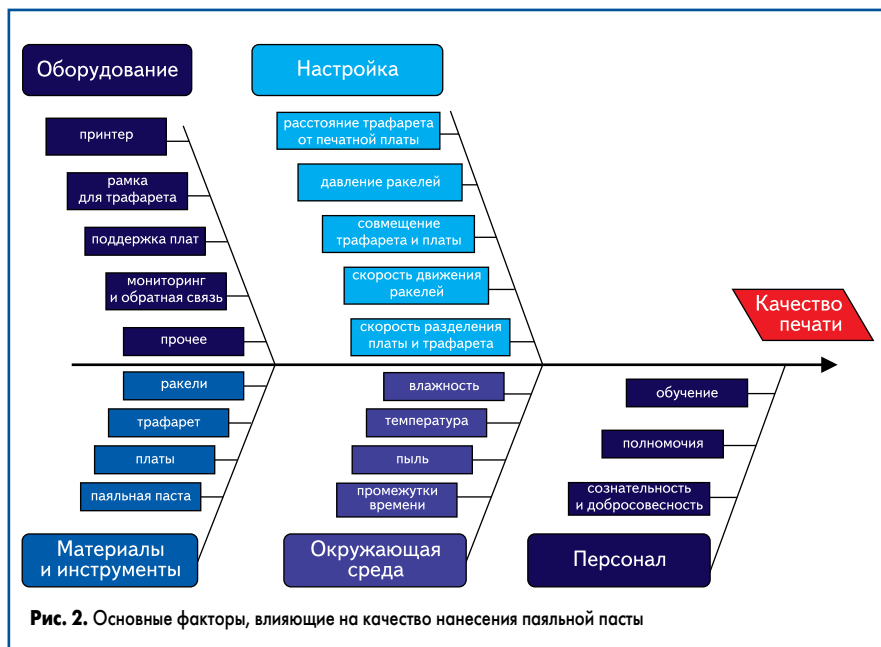
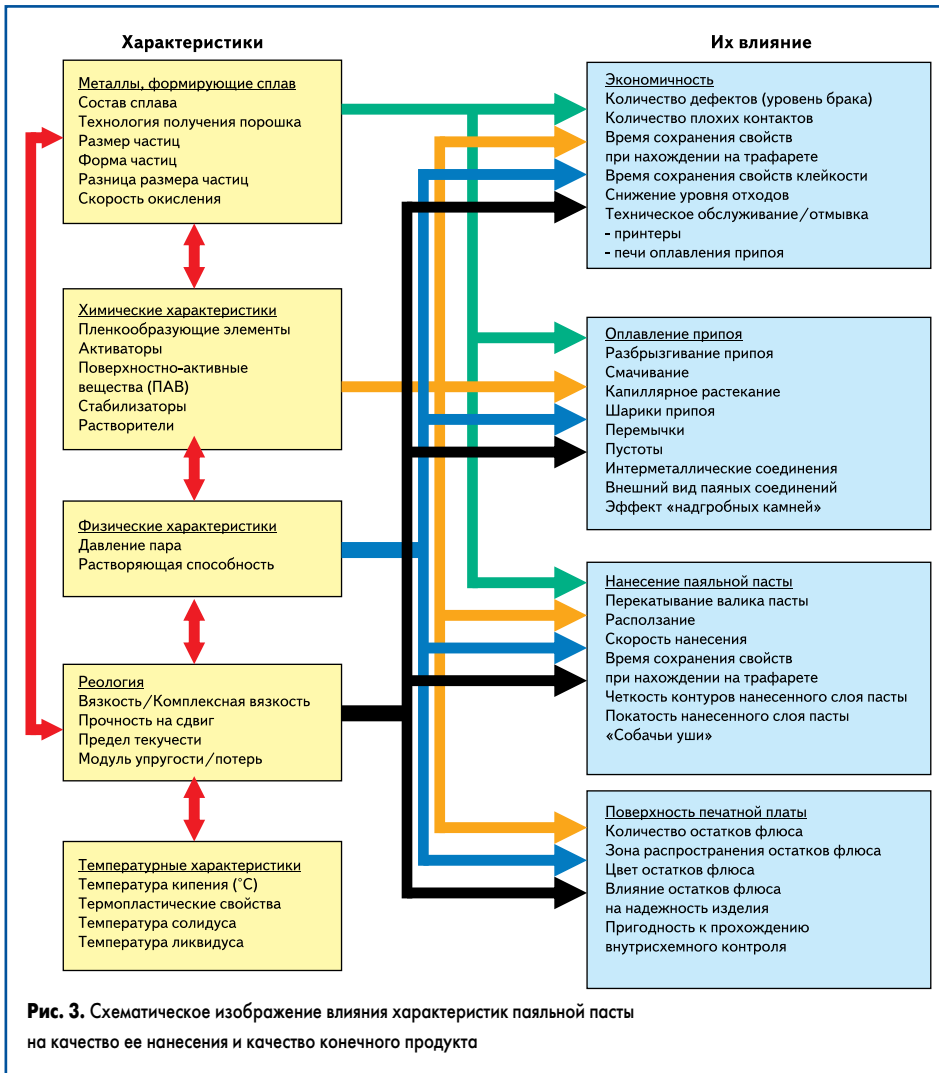


Рис. 2. Основные факторы, влияющие на качество нанесения паяльной пасты



ляющими. Например, скорость окисления порошка во многом определяется размером и формой его частиц.

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.

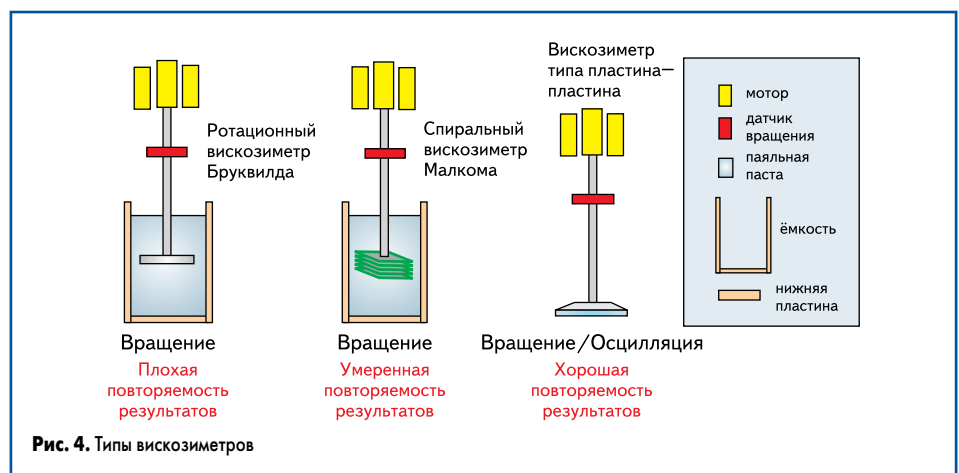
**Реология паяльной пасты**

Реология — это наука, которая занимается изучением характеристик текучести и деформации 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 (перекачивание 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 нью-

тоновскому 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 <sup>-1</sup>	Вискозиметр Пар-Физика UDS-200, контролируемое касательное напряжение сдвига, данные получены при 6 с <sup>-1</sup>
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 ( $TI$ ) выглядит следующим образом:

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

где  $\eta$  — вязкость (Па·с);  $D$  — скорость сдвига ( $\text{с}^{-1}$ ).

График индекса тиксотропности ( $TI$ ) 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

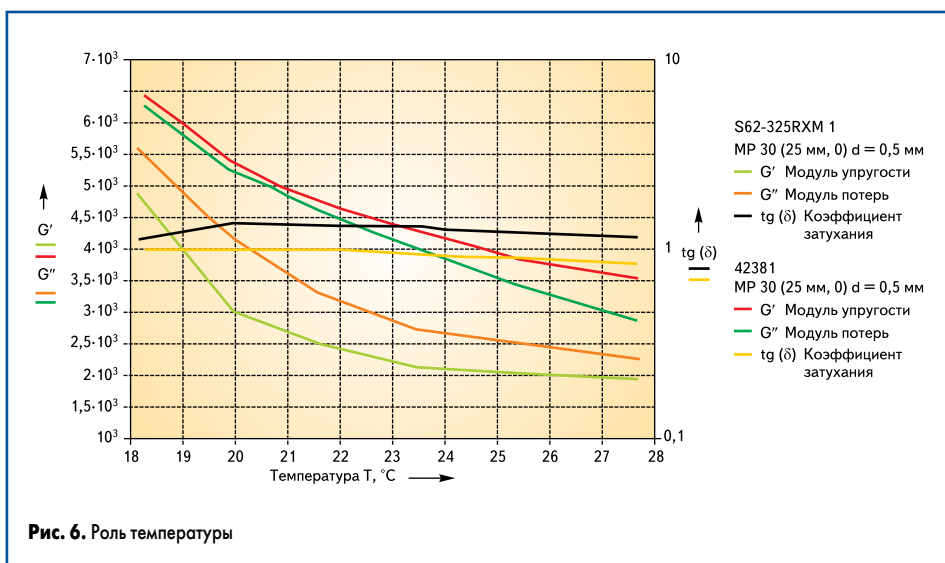
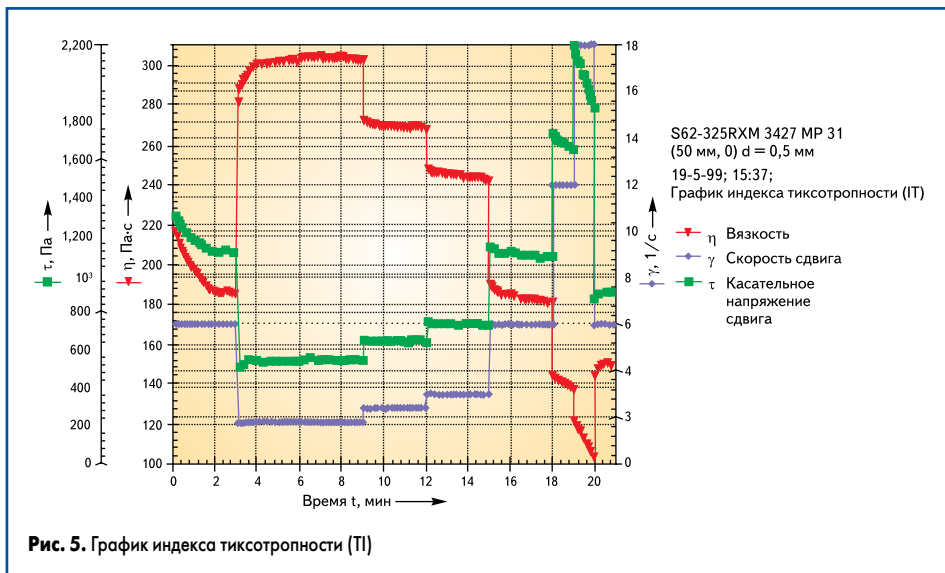
Обычно поставщики паяльных паст называют покупателям допустимый диапазон рабочих температур для своей продукции. Важность этих рекомендаций можно понять, изучив приведенный график (рис. 6). Он построен на основе данных, полученных в ходе проверки разброса показателей осцилляции при неизменяемых настройках очень низких амплитуды и частоты колебаний. Измеряются следующие показатели: модуль упругости ( $G'$ ), модуль потерь ( $G''$ ) и  $\text{tg } \delta$ . С помощью этих измерений можно четко показать, что температура паяльной пасты в  $18^\circ\text{C}$  слишком низкая, так как значения параметров  $G'$  и  $G''$  при температуре ниже  $22^\circ\text{C}$  слишком высокие. Кроме того, неверно их соотношение ( $\text{tg } \delta$ ). При температуре выше  $26^\circ\text{C}$  эти параметры достигают таких значений, которых 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-ХМ1. Для этих паяльных паст оптимальное температурное окно находится в пределах  $22\dots 26^\circ\text{C}$ .

### 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 ( $\text{tg } \delta$ ).

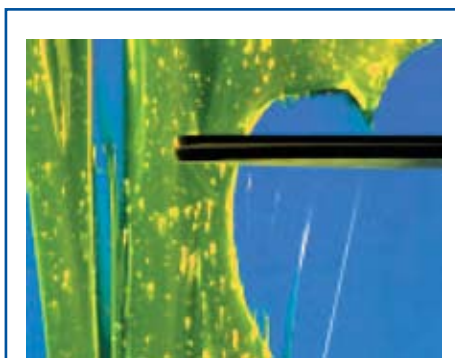
Во время хранения, перевозки и после нанесения паяльной пасты характеристики эластичности (модуль упругости) наиболее важны. Поэтому значение  $\text{tg } \delta$  должно быть  $< 1$  в пределах определенных максимальных и минимальных значений. Точное значение коэффициента эластичности паяльной пасты можно определить только лишь с помощью



сложного оборудования, учитывающего показание 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



**Рис. 7. Слишком большая упругость вещества затрудняет его нанесение**

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

Флюсующая составляющая в паяльной пасте состоит из нескольких функциональных групп, например, канифоли и добавок, влияющих 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 структуры. После того как вещества полностью перемешаются в системе растворителей, молекулы начинают сплетаться и формируют так называемую реологическую сеть (суперструктуру).

Короткие цепочки суперструктуры имеют слабые связи. Это в большей степени относится к паяльным пастам с четко выражен-

ным пределом текучести. В этих случаях суперструктуры характеризуются наличием дипольных межмолекулярных сил, водородных связей, электростатических сил и/или сил Ван-дер-Ваальса. Эти связи легко распадаются и быстро восстанавливаются, что характерно для псевдопластического поведения течения, например, в паяльных пастах с хорошо сбалансированной формулой.

Для каждой суперструктуры, чтобы сформировались оптимальные связи, требуются индивидуальные рабочие температуры. Они подбираются в зависимости от используемой системы растворителей. Суперструктура — это та взаимозависимость элементов, которая должна быть получена для достижения оптимальных результатов нанесения паяльной пасты. Система растворителей — это, главным образом, взаимозависимость параметров продолжительности сохранения свойств пасты на трафарете и клейкости, а также интенсивности растворения, необходимой для составляющих веществ, чтобы сформировалась суперструктура. Кроме этого, температурный профиль в печи оплавления и характеристики органических остатков, сформировавшихся в результате оплавления припоя, — это ключевые факторы выбора химических веществ для флюсующей составляющей паяльной пасты.

### Система растворителей

Чтобы паяльная паста сохраняла свои свойства на трафарете и свойства клейкости после нанесения в течение 8 часов и больше, необходимо тщательно подбирать систему растворителей с очень низким коэффициентом испарения при комнатной температуре. Но даже без этого условия при создании формулы паяльной пасты приходится решать множество проблем, связанных с системой растворителей. Это обусловлено тем, что (впрочем, как и во всем, что касается химии) универсального растворителя, идеально подходящего для всех задач, когда речь заходит о растворимости существенного количества разнородных органических веществ, входящих в состав флюса, нет.

Чтобы достичь максимально возможной повторяемости результатов и эффективности растворения вне зависимости от обычных отклонений химических и физических характеристик сырья, потерь растворителя при производстве и использовании паяльной пасты, диапазон растворяющей способности должен быть достаточно большим. Это важно, когда приходится работать с упомянутыми выше допустимыми отклонениями и гарантированно добиваться повторяемых результатов нанесения паяльной пасты.

Обычно использование низких температур при производстве флюса приводит к неполному формированию суперструктуры. А слишком высокие рабочие температуры во время производства или хранения и/или перевозки могут привести к частичному растворению некоторых групп в суперструктуре, их разъединению и формированию агломе-

ратов, что, в свою очередь, отрицательно скажется на характеристиках вязкости и эластичности паяльной пасты.

### Роль скорости сдвига и параметров реологии паяльной пасты

Бывает, что паяльная паста расслаивается и расплзается. Склонность к расслоению и расплзанию определяется при низкой или сверхнизкой скорости сдвига. Консистенции перемешанной паяльной пасты обычно соответствует среднее значение скорости сдвига. При нанесении паяльной пасты, особенно в момент ее распределения ракелем, наблюдаются самые высокие значения скорости сдвига. Паяльная паста — это сложная смесь частиц металла и множества полимеров: от самой простой, незначительно модифицированной канифоли и до больших канифолесодержащих систем с молекулярной массой, растворителя (-ей), активатора (-ов), реологических и множества других добавок, влияющих на свойства пасты.

Сами по себе реологические добавки не формируют всю общую реологию паяльной пасты. На свойства текучести влияют все составляющие ее элементы. На такую характеристику вязкости, как скорость сдвига, а значит, и на все характеристики нанесения пасты, в первую очередь влияют частицы металлов, канифоль, растворители и некоторые другие модифицированные добавки. В целом, значение скорости сдвига будет тем выше, чем больше в пасте металлов или чем выше молекулярная масса канифоли. Также, если уменьшится размер частиц металлического порошка или интенсивность воздействия системы растворителей, то сила сдвига увеличится.

### Стабильность паяльной пасты во время хранения, перевозки и в момент нахождения в принтере

В новой банке с пастой или на новой пасте в любой другой фасовке не должно быть сухой корки. Поверхность в норме слегка влажная и блестящая. При длительном нахождении в состоянии покоя (нанесенный слой пасты на плате или хранение и перевозка) может произойти расслоение. В случае с паяльной

пастой флюс поднимется вверх, а более тяжелые частицы припоя опустятся вниз.

Устойчивость паяльной пасты к расслоению — очень важный параметр. Сегодня для паяльных паст также важно сохранение свойств при длительном сроке хранения (несколько месяцев) на складе, а также в закрытых головках печати трафаретных принтеров в течение нескольких недель. Хранение можно рассматривать как продолжительное нахождение пасты в состоянии покоя при определенной температуре. В этом случае на паяльную пасту воздействуют условия окружающей среды.

Склонность паяльной пасты к расслоению можно выразить следующим уравнением:

$$V = \frac{d^2 \times g}{18 \eta_{fl}} (\rho_p \times \rho_{fl}),$$

где  $d$  — диаметр частиц, м;  $g = 9,81$  м/с<sup>2</sup> — ускорение, связанное с силой земного притяжения;  $\eta_{fl}$  — вязкость вещества, Па·с;  $\rho_p$  — плотность частиц, кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_{fl}$  — плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>.

В зависимости от химического состава флюса и плотности порошка скорость расслоения составляет порядка  $3-5 \times 10^{-4}$  м/с (без учета температуры хранения, пограничных слоев и соединений). Эти параметры существенно снижают процесс расслоения. Температуру хранения можно ввести в опыт по определенной тенденции к расслоению. Известны 3 составляющие длительного сохранения свойств паяльной пасты.

### Предел текучести

Первая составляющая — предел текучести. Предел текучести, или точка текучести — это самое высокое значение касательного напряжения сдвига на кривой текучести, при котором паяльная паста все еще не течет. Это точка, в которой действующие внешние силы (сила земного притяжения, ракеля) больше внутренних сил суперструктуры паяльной пасты. При значении ниже значения предела текучести свойства эластичности паяльной пасты сохраняются. Паста ведет себя как твердое вещество. Она не деформируется, то есть не расслаивается и не расплзается. Традиционно предел текучести определялся в ротационных вискозиметрах в режиме контролируемого касательного напряжения сдвига (CSS). Чем выше значение

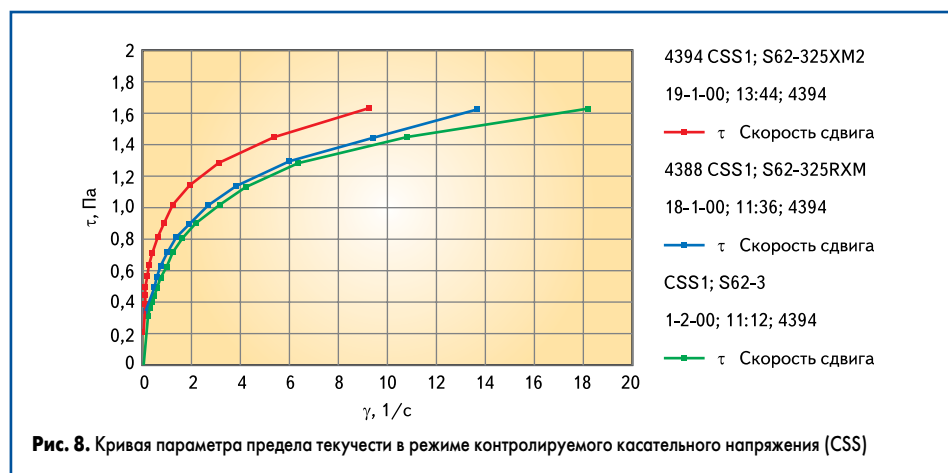


Рис. 8. Кривая параметра предела текучести в режиме контролируемого касательного напряжения (CSS)

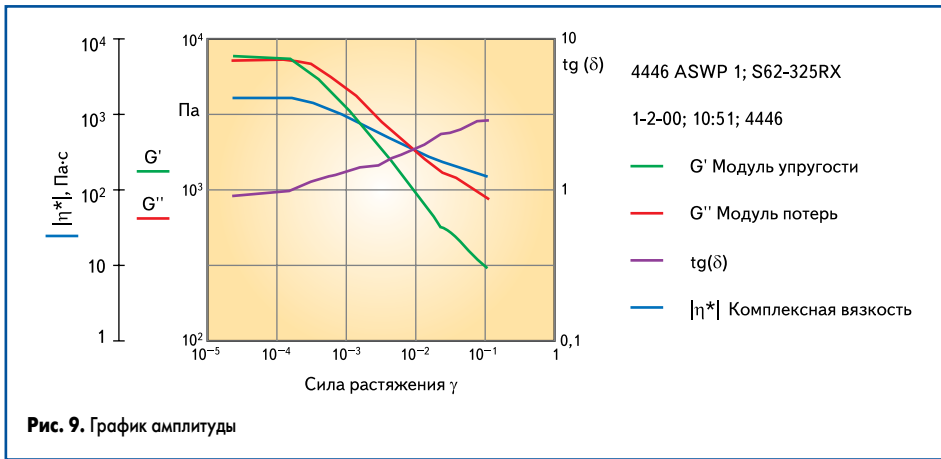


Рис. 9. График амплитуды

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. Можно сказать, что на практике 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 расплзанию.

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 ( $\eta^*$ ) 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 расплзанию (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 верхней 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 апертур 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 апертур трафарета заполняются, так сказать, по обратной траектории. Высокоскоростная видеосъемка четко показывает, что после пересечения края апертур паяльная паста не сразу заполняет аперттуру, 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 апертур. В результате этого часть паяльной пасты упадет вниз и будет заполнять аперттуру, двигаясь в обратную сторону, до тех пор, пока не будет срезана лезвием ракеля или закрытой печатной головкой. Скорость заполнения апертур 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 апертур, м;  $R$  — ширина апертур, %;  $B$  — обратное движение, %.

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

$$V = 0,0002 \frac{\left( \frac{100-10}{100} \right) \left( \frac{100-30}{100} \right)}{0,1} = 0,00126 \text{ м/с.}$$

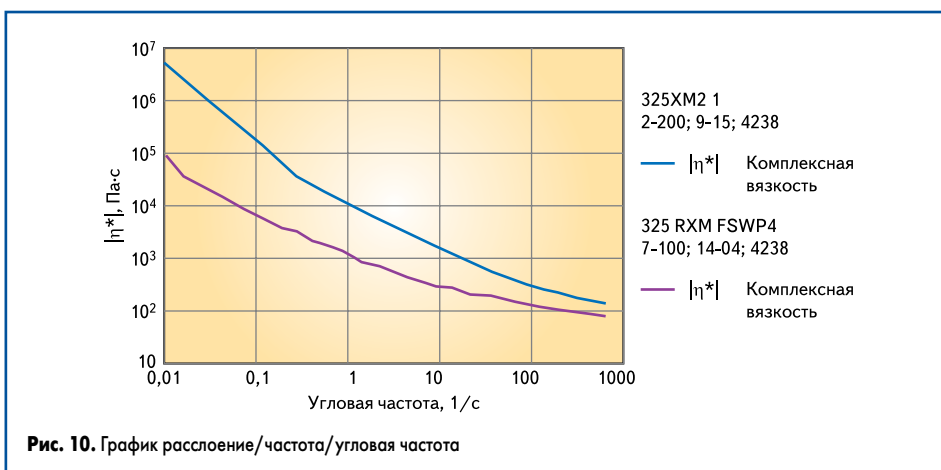


Рис. 10. График расслоение/частота/угловая частота

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  $25,2 \text{ с}^{-1}$ .

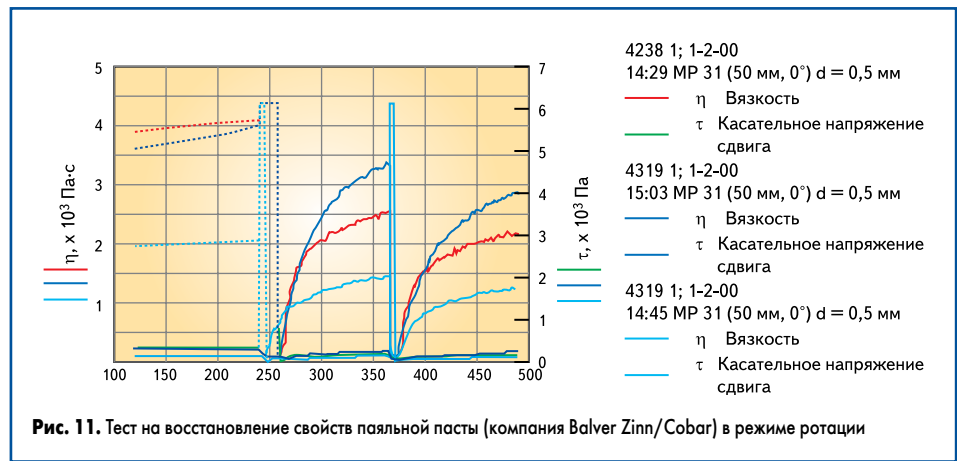
Как сказано ранее, частота должна оставлять порядка 800 Гц. В процессе подготовки этого опыта мы обнаружили, что при значениях выше 500 Гц существенных отличий не наблюдается. Сегодня в самых хороших вискозиметрах максимальная частота осцилляции составляет 100 Гц. Тем не менее, следует осторожно использовать 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 ( $\eta^*$ ) — 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 ( $\eta^*$ ) — 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**

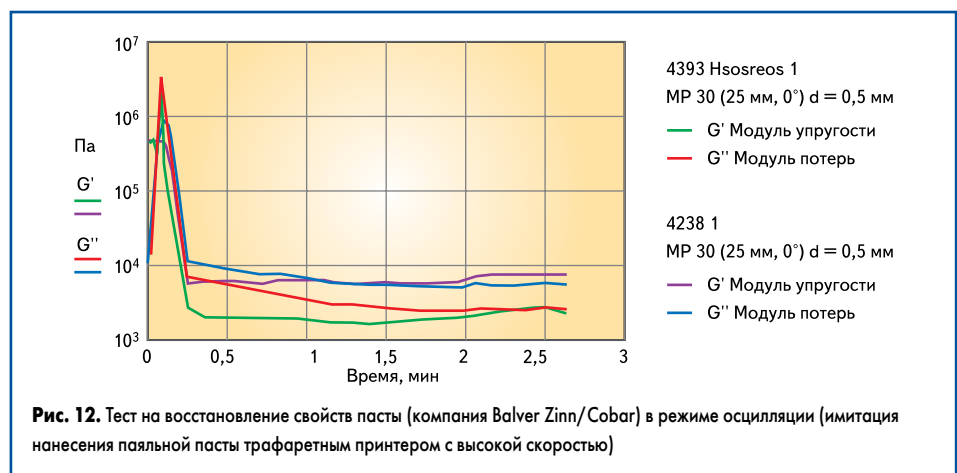
Рассмотрим тест на восстановление в режиме ротации (рис. 11). В первой фазе паяльная паста находится в состоянии покоя, так как на нее действует сверхнизкая скорость сдвига. Вторая фаза — это фаза действия на пасту различных сил в течение 3 с. В этой фазе воспроизводятся условия нанесения паяльной пасты 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-RXM (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-RX (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 ( $>500 \text{ Гц}$ ) 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 амплитуды 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 перекачивается лучше. Значения обоих параметров  $G'$  и  $G''$  ниже, как и в случае с пастой 325-RXM (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-RXM 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-XM2 оба параметра восстанавливаются гораздо быстрее, и параметр  $G'$  вырастает больше параметра  $G''$  тоже гораздо быстрее. Поэтому данная паста менее чувствительна к расползанию.

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. ■