

Актуальные проблемы прогнозирования надежности паяных соединений.

Термомеханические усталостные модели

В предыдущей статье мы обсуждали обширную тему надежности паяных соединений (ПС) поверхностного монтажа и отметили существование пяти основных факторов, повреждающих ПС. Большинство отказов подобных соединений можно отнести на счет термомеханической усталости (ТМУ), из-за которой, как свидетельствует статистика, приводимая DFR Solutions [1], происходит свыше 68% отказов РЭА. А потому рассмотрение проблемы количественной оценки надежности ПС мы начнем именно с механизма их повреждения — с термомеханической усталости.

Константин Тихомиров

fixkost@gmail.com

Сергей Алексеев

Alexeev@corp.avangard.org

Подходы к прогнозированию надежности и их недостатки

На сегодня существует огромное количество подходов к прогнозированию надежности ПС поверхностного монтажа в условиях нагружений, вызванных ТМУ. Зачастую они не охватывают весь комплекс действующих факторов, имеют свои границы применимости и разную степень точности. В этой статье мы приведем критерии выявления отказа в натуральных испытаниях, предлагаемые различными учеными и нормативными документами, и дадим классификацию современных моделей для прогнозирования надежности ПС при разных уровнях температурных нагрузок, временах удержания и скоростях нагрева/охлаждения.

Термомеханическая усталость возникает вследствие циклически меняющейся температуры, которая вызывает термомеханические напряжения и, соответственно, деформации из-за различия коэффициентов температурного расширения печатной платы, чипа, паяного соединения, а в случае применения компонентов типа CSP — и компаунда. Внутренние напряжения могут быть вызваны микроструктурным укрупнением, которое неизбежно происходит в условиях температурного старения или термоциклирования, а также из-за ряда других причин, описанных в предыдущей статье [2].

Современный подход к надежностному моделированию можно представить в следующем виде. Для начала требуется выбрать конституционное уравнение, которое в полной мере может описать напряженно-деформированное состояние не только ПС, но и входящих в печатный узел компонентов. Для этого необходимо оценить влияние на систему разных типов деформации в зависимости от свойств материалов и типов прикладываемых нагрузок.

Рассмотрим вариант анализа ТМУ, который предложил один из наиболее авторитетных исследователей проблем надежности ПС Дарве и его соавторы [3]. В соответствии с их подходом, общая деформация представляется в следующем виде:

$$\gamma = \gamma_p + \gamma_s + \gamma_T, \quad (1)$$

где γ — общая деформации сдвига; γ_p — временно-независимая пластическая деформация; γ_s — деформация установившейся (вторичной) стадии ползучести; γ_T — деформация неустановившейся ползучести. Нужно отметить, что в реальности эти три слагаемых существуют совместно, и поэтому при проведении испытаний трудно выделить каждое из них для количественной оценки.

Дарве предложил следующий метод расчета этих трех слагаемых:

$$\gamma_p = C_2 (\tau/G)^{m_p}, \quad (2)$$

$$\gamma_s = \dot{\gamma}_s t, \quad (3)$$

$$\gamma_T = \gamma_t [1 - \exp(-B \dot{\gamma}_s t)]. \quad (4)$$

Здесь C_2 — коэффициент пластической деформации; τ — прикладываемое напряжение сдвига; G — модуль сдвига; m_p — степень чувствительности пластической деформации к прикладываемому напряжению; $\dot{\gamma}_s$ — скорость установившейся деформации ползучести; t — время; γ_t — начальная величина неустановившейся деформации ползучести; B — коэффициент неустановившейся ползучести.

Для описания ползучести ПС на сегодня предложено более 20 моделей [4]. По мнению авторов, одним из лучших вариантов для оценки вторичной ползучести, применительно к поставленной в статье задаче, можно считать модифицированный закон Гарофало [3]:

$$\dot{\gamma}_s = C_1 \frac{G}{T} \left[\sinh \left(\alpha \frac{\tau}{G} \right) \right]^{n_s} \exp \left(- \frac{Q}{RT} \right), \quad (5)$$

где C_1 — коэффициент напряжения; n_s — степень чувствительности установившейся ползучести к прикладываемому напряжению; Q — так называемая энергия активации (она относится к «активации» механизмов ползучести, описание которых будет

Таблица 1. Параметры припоев

Материал ПС	G_0 (при 0 °С), 10 ⁴ МПа	G_1 10 ⁴ МПа	C_1 К/с/МПа	α	n_s	Q , эВ	B	γ_1	C_2	m_p
60Sn40Pb	1,31	0,559	28,72	1300	3,3	0,548	440	0,02	$2,3 \times 10^{13}$	5,6
62Sn36Pb2Ag	1,31	0,559	14,344	1300	3,3	0,548	137	0,037	$6,6 \times 10^7$	4,5
96,5Sn3,5Ag	1,931	0,689	$7,09 \times 10^{-2}$	1300	5,5	0,4	147	0,086	2×10^{11}	4,4
97,5Pb2,5Sn	0,896	0,103	$7,31 \times 10^9$	1200	7	1,2	137	0,115	$2,8 \times 10^{10}$	4

приведено при рассмотрении моделей, основанных на деформации ползучести); α — постоянная свойств материала; T — температура в кельвинах; R — универсальная газовая постоянная.

Поскольку модуль сдвига является температурно-зависимым свойством материала, то:

$$G = G_0 - G_1 \times T \text{ (}^\circ\text{C)}, \quad (6)$$

где G_0 — модуль сдвига при температуре 0 °С; G_1 — поправочный коэффициент.

Параметры общего уравнения (1) для ряда припоев сведены в таблицу 1.

Заканчивая разговор о методике, предложенной Дарве, следует уточнить, что она имеет свои недостатки — например, плохо согласуется с экспериментальными данными в условиях высоких скоростей приращения температуры, — однако может удовлетворительно описывать поведение припоев в диапазоне температур $-25 \dots +150$ °С.

После выбора конституционного уравнения необходимо создать на его основе конечно-элементную (КЭ) модель печатного узла. Программа КЭ-моделирования просчитает напряженно-деформированное состояние системы (печатного узла), и с помощью процессора постобработки можно вывести требуемые для усталостных моделей величины (в частности, суммарную пластическую деформацию, суммарные термомеханические напряжения по Мезису¹ и др.). Зачастую для сокращения времени, затрачиваемого компьютером, прибегают к упрощениям уравнений. Например, одно из часто используемых допущений — пренебрежение компонентом деформации ползучести, при котором оценивается вклад только пластической и упругой деформаций. Это упрощает решение, но предполагаемая незначительность деформации ползучести может привести к значимым ошибкам, и само решение приходится «подгонять» эмпирическими коэффициентами для лучшей корреляции с экспериментальными данными (так называемое приближение с помощью кривых). Но обычно даже с такими допущениями уравнения остаются довольно сложными.

Что касается размерности КЭ-модели, известен ряд примеров решения задачи анализа ТМУ на основе 2D-моделей печатного узла, дающих в некоторых случаях удовлетворительные результаты. Однако можно показать, что у 2D-моделирования применительно к этой задаче имеется целый ряд принципиальных недостатков. Оставляя их обсуждение за рамками статьи, отметим, что при 3D-моделировании существенной проблемой становится неадекватно большое количество времени, требующееся для расчета полноразмерной модели печатного узла, обусловленное нелинейностью, содержащейся в уравнении (1). Поэтому очень часто моделирование проводится для 1/2, 1/4 или даже 1/8 от реальной сборки [5], «разрезанной» по так называемым границам симметрии модели² (рис. 1).

В поставочных комплектах пакетов программ для КЭ-моделирования, таких как ANSYS и Abaqus, предлагается несколько примеров расчета напряженно-деформированного состояния ПС. Однако чрезвычайно высокая степень упрощения, принятая в этих примерах, вероятно, достаточная для демонстрации основных функций программы, делает их совершенно непригодными для использования в качестве руководства и применения их результатов в моделях прогнозирования усталостной долговечности.

В другом, более простом варианте, можно воспользоваться современным специализированным программным обеспечением для расчета надежности ПС (типа Sherlock, SRS solution). Но следует отметить, что компании, предоставляющие такое ПО, зачастую предлагают его в виде некоего «черного ящика», в который нужно лишь ввести данные об условиях эксплуатации, используемых материалах и т. д. Это, несо-

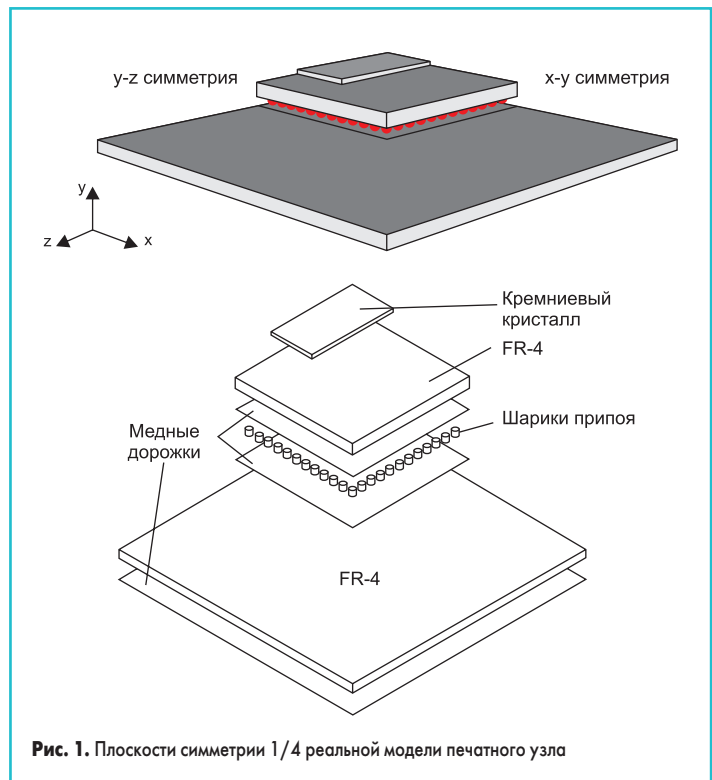


Рис. 1. Плоскости симметрии 1/4 реальной модели печатного узла

мненно, удобно, но за кадром остается вопрос понимания того, что же там считается. И далеко не факт, что подходы, примененные для расчета надежности, будут адекватны и смогут точно описать поведение ПС в нетипичных, то есть жестких условиях эксплуатации.

Мы показали два варианта действий, которыми сейчас в основном пользуются инженеры при расчете усталостной долговечности ПС. Каждый из них имеет свои недостатки. Аналитические модели, подобные модели, основанной на уравнении Дарве, при расчете методом КЭ вынуждают прибегать к упрощениям, в конечном итоге приводящим к необходимости корректировать результаты расчета эмпирическими данными. Готовые программные пакеты, освобождая пользователя от сложной аналитической работы, не гарантируют получения адекватного результата, в частности для жестких условий эксплуатации проектируемой аппаратуры. Поэтому в последние годы появилось множество работ, содержащих новые предложения по подходам к моделированию надежности ПС и методикам, эти подходы реализующим. Для того чтобы оценить такие подходы и выбрать из них тот, который наилучшим образом соответствует поставленной задаче, требуется более глубокое понимание моделирования, в том числе физических основ усталостных моделей и самого главного — понятия усталостного отказа.

Выявление усталостного отказа

Что же такое усталостный отказ? Это понятие играет важнейшую роль в экспериментальных и теоретических исследованиях и довольно сильно отличается от интуитивного определения «отказа».

В литературе есть много расхождений в определении понятия «усталостный отказ». В классическом «металлургическом» смысле «усталостный отказ происходит, когда компонент испытывает циклические напряжения и деформации, которые приводят к постоянному повреждению» [6]. Предлагается рассматривать две основные стадии усталостного отказа, под которым подразумевается разлом ПС. Первый этап — зарождение трещины, начинающийся с первого цикла нагрузки и заканчивающийся при обнаружении трещины, второй этап — распространение трещины, начинающийся с ее обнаружения и продолжающийся до полного разрушения ПС.

1 Напряжения по Мезису в общем случае используются для получения информации о способности материала выдержать нагрузки; если напряжения по Мезису больше, чем предельное напряжение (обычно — предел текучести), то материал начинает повреждаться (разрушаться).

2 Граница симметрии — плоскость, относительно которой симметричны все параметры (геометрия, материальные свойства, все внешние воздействия) получаемой частичной модели.

Таблица 2. Варианты критериев усталостного отказа

Стандарт/Авторы	Вид испытания	Критерий отказа	
		Непрерывный контроль сопротивления (Event detector)	Контроль сопротивления между циклами (Data logger)
IPC-SM-785 (1992)/[7]	Термоциклирование	Первое событие — превышение сопротивления ≥ 1000 Ом длительностью более 1 нс, подтверждающееся затем девятью разрывами электрической цепи на количестве циклов, соответствующем 10% циклов, на которых получено первое событие	
IPC-9701 (2002)/[8]; IPC-9701A/(2006); JESD22-B111 (2003)/[9]	Термоциклирование	Первое событие — превышение сопротивления ≥ 1000 Ом длительностью более 1 мкс, подтверждающееся затем девятью разрывами электрической цепи на количестве циклов, соответствующем 10% циклов, на которых получено первое событие	Повышение сопротивления на 20% в пяти последовательных регистрациях
IPC/JEDEC-9702 (2004)/[10]	Тест на изгиб*	Повышение сопротивления на 20%	
Лау и соавторы [11]	Термоциклирование	Превышение сопротивления ≥ 450 Ом	
Фарук и соавторы [12]	Термоциклирование	Повышение сопротивления на 10 Ом	
Сухлинг и соавторы [13]	Термоциклирование	Повышение сопротивления на 5 Ом	
ОАО «Авангард», Санкт-Петербург	Термоциклирование	Превышение сопротивления ≥ 300 Ом на время, большее 1 мкс**	

Примечания. * Усталостные эффекты в тестах на изгиб сходны с ТМУ [14].

** Регистратор отказов тестовых цепей ПИЖМ.467562.007.

Таким образом, с точки зрения практических значимых действий определение отказа сводится к фиксации некоторого визуального эффекта. В реальности, учитывая конфигурацию печатного узла, очень сложно отследить начало и распространение усталостных трещин; отсюда возникает необходимость выбора критерия отказа, поддающегося однозначному детектированию в эксперименте. Для целей настоящей статьи этого достаточно. Мы рассматриваем проблему прогнозирования усталостной долговечности при помощи моделей усталостного отказа, и для нас в конечном итоге важно установить достоверность модели — степень точности совпадения времени до наступления отказа, рассчитанного по данной модели, с аналогичным параметром, получаемым при натуральных испытаниях. В таком случае нас интересует не столько теоретическое определение отказа, сколько критерий его выявления в ходе испытаний. Поэтому необходимо сказать несколько слов о критериях фиксации отказа ПС, применяемых при испытаниях на надежность.

В сегодняшней практике в качестве критерия используется изменение электрического сопротивления ПС (однако это не единственный возможный критерий детектирования отказа, например, существуют рентгеновские и флуоресцентные методы), что основано на очевидной связи нарушения электрической целостности ПС с его механическим разрушением. Различные варианты такого критерия представлены в таблице 2. В качестве комментария к таблице необходимо отметить, что из-за разного определения критерия усталостного отказа становится очень трудно или даже невозможно сравнивать экспериментальные данные различных исследователей.

Важно отметить, что при таком подходе к выявлению отказа (повышение сопротивления или превышение порогового значения сопротивления) существует опасность возникновения двух типов ошибок. Первый тип связан с ложным детектированием отказа: при измерениях фиксируется превышение сопротивления над пороговым значением, определенным

как критерий отказа, однако в реальности трещины в ПС может еще не быть. Это случается из-за появления в испытательной установке, кабелях и окружающей среде электрического шума, который часто регистрируется детектором событий, предложенным к применению в стандарте IPC-9701. Второй тип ошибок — это, наоборот, ложное несрабатывание детектора событий, когда трещина уже появилась во всем ПС, но сопротивление не превысило порогового значения, установленного как критерий отказа. В [7] приводится утверждение, что ПС может не показывать электрический разрыв или даже значительное увеличение сопротивления, поскольку «отказавшее ПС обычно окружено другими, еще не отказавшими ПС, поэтому поверхности ПС, уже претерпевшего разлом, создают полностью механически нагруженный контакт».

Об этих ошибках следует помнить при проведении испытаний на надежность, в частности ускоренных испытаний, в том числе необходимых для проверки расчетной модели и уточнения «подгоночных» констант. Основываясь на опыте ОАО «Авангард», для защиты от таких ошибок можно предложить простой, но эффективный метод. Перед началом ускоренных испытаний требуется не менее 10 раз измерить сопротивление на гарантированно исправном ПС, что позволит установить диапазон естественного шума в установке, кабелях и т. д. В качестве критерия отказа следует задаться значением, превосходящим измеренный диапазон в 5 раз.

Здесь имеет смысл упомянуть еще об одном источнике возможной ошибки, не связанном непосредственно с сопротивлением паяного соединения, но прямо относящемся к теме ускоренных испытаний на усталостную прочность. Источником ошибочного вывода о выходе ПС из строя может стать неверное определение причины, приведшей к эффекту, трактуемому как отказ ПС; методика испытаний должна исключать или хотя бы минимизировать такую возможность. Для примера приведем выдержку из утвержденной программы

и методик ускоренных испытаний печатных узлов (ПУ) по определению (прогнозированию) долговечности паяных соединений поверхностного монтажа ОАО «Авангард»:

«1. Параметром — критерием годности является целостность последовательных тестовых цепей ПУ, состоящих из испытываемых паяных соединений одного типа, проводников ПП и внутренних связей ЭКБ. Критерием отказа контролируемой электрической цепи является ее сопротивление, превышающее 300 Ом. Причины нарушения целостности электрической цепи должны стать предметом тщательного анализа с целью идентификации именно отказов паяных соединений.

2. При возникновении отказа тестовой цепи необходимо выявить природу отказа несколькими способами:

- визуальный контроль;
- оптический контроль;
- рентгеновский контроль;
- электрический контроль.

3. Локализация отказа тестовой цепи производится в целях выявления природы отказа:

- отказ ПС;
- отказ внутреннего соединения компонента;
- отказ внутренних соединений ПП;
- отказ переходных отверстий ПП;
- отказ ПС разъема;
- отказ коммутационного жгута».

В испытаниях, проводимых с разными целями — для прогнозирования надежности при отработке конструкции либо ее подтверждения при сдаче изделия, для верификации модели либо их точной настройки, — в большинстве случаев используется критерий отказа по величине электрического сопротивления ПС, и осуществляются они по сходным в своей основе методикам. Модели же усталостной долговечности сегодня предлагаются разные, отличающиеся не только своим аналитическим аппаратом, но и принципами, на которых они основаны.

Усталостные модели

Модели, предложенные для прогнозирования усталостной долговечности паяных соединений, могут быть разделены на шесть главных категорий, основанных на различных подходах и принципах:

- а) напряженно основанные;
- б) на основе пластической деформации;
- в) на основе деформации ползучести;
- г) основанные на энергии (петля гистерезиса);
- д) основанные на механике разрушений;
- е) полностью эмпирические.

Обычно модели, основанные на напряжении, применяются к вибрациям или механическому удару [14]; такие модели здесь рассматриваться не будут, поскольку они не применимы к описанию усталости ПС при термоциклировании.

Для наглядности модели сведены в таблице 3 с указанием авторов, которыми они предложены. Позднее, при рассмотрении каждой из этих моделей, будут приведены ссылки на соответствующие источники.

Таблица 3. Усталостные модели

Усталостная модель	Деформация		Энергия	Механика разрушения	Эмпирические
	Пластическая	Ползучести			
Кoffин — Мэнсон	+				
Модель полной деформации	+				
Соломон	+				
Энгельмейер	+				
Майнер	+	+			
Кнетч и Фокс		+			
Ши		+			
Саид		+	+		
Акай			+		
Лианг			+		
Хейнрих			+		
Пэн			+		
Дарвеукс			+	+	
Столкартс				+	
Норрис и Ландсберг					+

Следует отметить, что это далеко не полный список существующих моделей, но в целом все модели укладываются в рамки данной классификации. Разница состоит в основном в выборе конституционного уравнения, описывающего состояние ПС под действием циклических нагрузок, а также в выборе коэффициентов, вводимых для более точного согласования с современными экспериментальными данными.

При выборе и дальнейшем использовании усталостных моделей необходимо учитывать целый ряд факторов, способных существенно повлиять на результаты расчетов. Так, если предполагается применение модели в качестве аналитического аналога быстрого термоциклирования (маленькое время удержания на экстремумах температуры), то для получения статистики отказов должны быть определены диапазоны и амплитуды напряжений. Кроме того, требуется ответить на очень важный вопрос: оправдано ли оценивать деформации как полностью пластические или следует отнести их к упругопластическим?

Если же модель ориентирована на отображение процессов, происходящих при медленном термоциклировании (длительное время удержания на экстремумах температуры), то более важную роль начинает играть деформация ползучести. Когда ползучесть оценена как несущественная, нужно учитывать разные типы распределения амплитуды пластических деформаций по фазам процесса нагружения. Во время лабораторных усталостных тестов условия термоциклирования идеализируются и обычно приближены к тому, что показано на рис. 2.

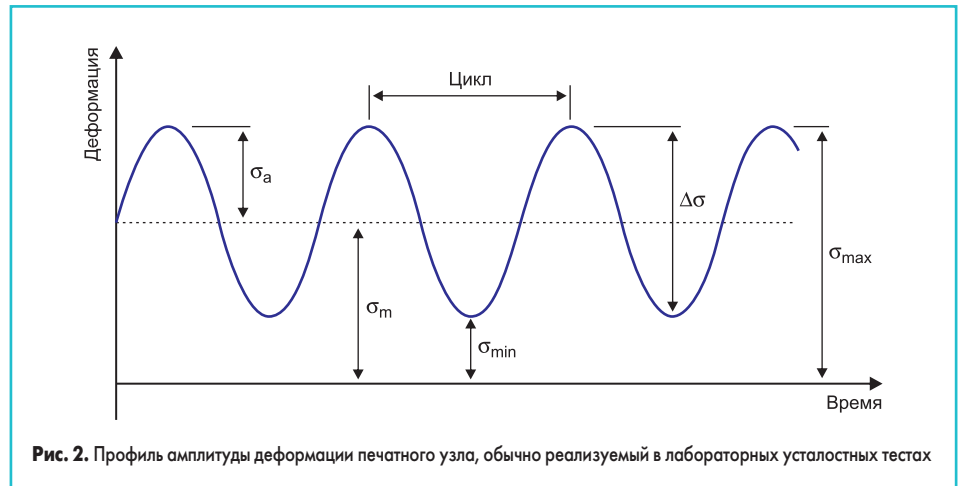


Рис. 2. Профиль амплитуды деформации печатного узла, обычно реализуемый в лабораторных усталостных тестах

На рис. 2 обозначены величины, которые будут использоваться при дальнейших описаниях моделей, вне зависимости от формы профиля амплитуды деформаций:

$$\sigma_m = (\sigma_{\max} - \sigma_{\min}) / 2 \text{ — среднее значение деформации;}$$

$$\sigma_a = (\sigma_{\max} - \sigma_{\min}) / 2 \text{ — амплитуда деформации;}$$

$$\Delta\sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min} \text{ — диапазон деформации.}$$

В реальных условиях эксплуатации профиль термически индуцированных деформаций печатных узлов с припаянными компонентами может кардинально отличаться от идеализированного, приведенного на рис. 2. Скорее он будет выглядеть так, как показано на рис. 3. Сравнивая три профиля, можно видеть, что при одинаковом диапазоне деформации Δσ его распределение между фазами сжатия и растяжения может быть несимметричным и варьироваться в зависимости от условий развития процесса во времени. Следовательно, очень важно правильно оценить дальнейшие эксплуатационные нагрузки и вызванные ими преобладающие деформации, а также правильно сопоставить условия ускоренных испытаний и эксплуатации.

Заключение

В статье мы показали основные слабости методов, в основном применяемых сегодня для аналитического прогнозирования усталостной прочности паяных соединений; описали методы выявления отказа ПС по критерию электрического сопротивления, предлагаемые различными стандартами и авторами; привели систематизацию ряда термомехани-

ческих усталостных моделей отказа ПС, отнес их к шести категориям в соответствии с подходами, на которых они основаны; указали на отдельные факторы, которые необходимо учитывать при выборе модели для использования в конкретных условиях. В следующих материалах мы подробно рассмотрим модели и их категории, кратко представленные в данной публикации.

Литература

1. McLeish J. Solder Attachment Reliability — A Physics of Failure Approach. CRE West Penn SMTA, July 19, 2013.
2. Тихомиров К. С., Алексеев С. А. Прогнозирование надежности паяных соединений: факторы, приводящие к повреждениям // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 2016. № 6.
3. Darveaux, R., Banerji, K. Constitutive Relations for Tin-Based Solder Joints // IEEE Transactions on Components Hybrids, and Technology. 1992, Vol. 15. № 6.
4. Mukherjee S., Nuhi M., Dasgupta A., Modarres M. Creep Constitutive Models Suitable for Solder Alloys in Electronic Assemblies // Journal of Electronic Packaging, September 2016. Vol. 138.
5. Tamin M. N., Shaffiar N. M. Solder Joint Reliability Assessment: Finite Element Simulation Methodology // Advanced Structured Materials. 2014. Vol. 37.
6. Bannantine J. A., Comer J. J., Handrock J. L. Fundamentals of metal fatigue analysis. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1990.
7. IPC-SM-785 Guidelines for Accelerated Reliability Testing of Surface Mount Solder Attachments.
8. IPC-9701 Performance Test Methods and Qualification Requirements for Surface Mount Solder Attachments.

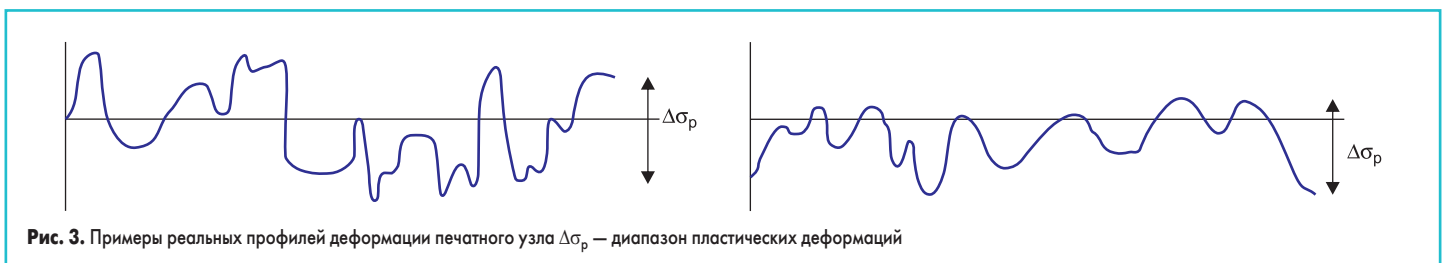


Рис. 3. Примеры реальных профилей деформации печатного узла Δσ_p — диапазон пластических деформаций

9. JESD22-B111 Board Level Drop Test Method of Components for Handheld Electronic Products.
10. IPC/JEDEC-9702 Monotonic Bend Characterization of Board-Level Interconnects.
11. Lau J. H., Hoo N., Horsley R., Smetana J., Shangguan D., Dauksher D., Love D., Menis I., Sullivan B. Reliability Testing and Data Analysis of Lead-Free Solder Joints for High-density Packages // Soldering & Surface Mount Technology. 2004. Vol. 16. № 2.
12. Farooq M., Goldmann L., Martin G., Goldsmith C., Bergeron C. Thermo-Mechanical Fatigue Reliability of Pb-Free Ceramic Ball Grid Arrays: Experimental Data and Lifetime Prediction Modeling. Proceedings of the 2003 IEEE. CPMT Electronic Components and Technology Conference. New Orleans, LA, 2003.
13. Suhling C., Gale H. S., Johnson R. W., Islam M. N., Shete T., Lall P., Bozack M. J., Evans J. L., Seto P., Gupta T., Thompson J. R. Thermal Cycling Reliability of Lead-Free Chip Resistor Solder Joints // Soldering & Surface Mount Technology. 2004. Vol. 16. № 2.
14. Solomon H. D., Tolksdorf E. D. Energy approach to the fatigue of 60/40 solder. Part 1: Influence of temperature and cycle frequency // Journal of Electronic Packaging, Transactions of the ASME. 1995. Vol. 117. № 6.