

Природа внутренних напряжений в защитных компаундах

В статье рассмотрены способы уменьшения в защитных полимерных покрытиях внутренних напряжений, связанных с разницей коэффициентов линейного расширения (термические внутренние напряжения).

**Василий Илларионов,
Сергей Нанушьян**

siel@eos.incotrade.ru

В современной радиоэлектронной аппаратуре (РЭА) широко применяется заливка электронных деталей, узлов и блоков компаундами на основе полимерных смол и каучуков. Такой вид защиты является эффективным средством защиты поверхности РЭА от воздействия влаги, повышает стойкость изделия к воздействию ударов, вибрации и других агрессивных воздействий и тем самым увеличивает надежность аппаратуры.

Однако герметизация полимерами имеет и недостатки, на которые необходимо всегда обращать внимание. Это, прежде всего, низкая теплопроводность компаундов и особенно внутренние напряжения, возникающие в объеме заливки вследствие усадки и разницы коэффициентов теплового расширения компаунда и защищаемого объекта.

Разработчик на стадии создания изделия, как правило, не рассматривает задачу защиты и герметизации полимерными материалами и не закладывает соответствующие конструктивные решения, оставляя право выбора технологю.

При наличии на сегодняшний день большого количества различных компаундов сделать правильный выбор очень сложно. Как правило, выбор происходит либо по аналогии с предыдущими решениями, либо по сумме всех свойств компаунда.

Такой подход не позволяет подобрать оптимальный тип и марку компаунда, а в итоге сокращается ресурс изделия или изделие не отвечает параметрам его эксплуатации.

Одним из подводных камней выбора компаунда являются внутренние напряжения, возникающие в изделии после заливки и сушки. Рассмотрим причины возникновения внутренних напряжений и способы их нейтрализации.

Причиной возникновения внутренних напряжений является усадка, возникшая в процессе формирования и старения, а также различие коэффициентов термического расширения покрытия и подложки. Таким образом, внутренние напряжения бывают усадочными и термическими.

Усадочные напряжения

При формировании пленки из раствора ее объем уменьшается вследствие ухода растворителя и полимеризационного уплотнения после отверждения. Если свободная пленка после отверждения уменьшается в своем объеме, то пленка, нанесенная на подложку, оказывается растянутой и в ее поперечном сечении возникает упругая сила, стремящаяся сократить пленку. Эта сила, отнесенная к единице площади поперечного сечения пленки, и представляет собой внутренние напряжения ($\sigma_{вн}$). Так как в процессе затвердевания объем пленки всегда уменьшается, то внутренние напряжения в ней могут быть только напряжениями растяжения. Внутренние напряжения в покрытии можно рассчитать по формуле:

$$\sigma_{вн} = E \times \varepsilon / (1 - \mu) \quad (1)$$

где E — модуль упругости пленки; ε — относительное удлинение пленки; μ — коэффициент Пуассона.

Термические напряжения

Формирование покрытия при высоких температурах приводит к тому, что при охлаждении в покрытии возникают термические внутренние напряжения, вызванные разницей коэффициентов термического расширения полимера и подложки. Тогда абсолютное удлинение покрытия можно записать как $\Delta L = L \times (\alpha_{п} - \alpha_{подл}) \times \Delta T$ и внутренние напряжения в покрытии составят

$$\sigma_{вн} = E \times (\alpha_{п} - \alpha_{подл}) \times \Delta T \times E / (1 - \mu) \quad (2)$$

где $\alpha_{п}$, $\alpha_{подл}$ — коэффициенты термического расширения (ТКЛР) полимера и подложки, ΔT — разница температуры наблюдения формирования покрытия и текущей температуры.

В этой статье будут рассмотрены внутренние напряжения, связанные с разницей коэффициентов линейного расширения (или термические внутренние напряжения).

Наличие в полимерном защитном покрытии внутренних напряжений может вызвать следующие отрицательные явления. Если внутренние напряжения ($\sigma_{\text{вн}}$) окажутся больше предела прочности полимера на растяжение, то покрытие будет растрескиваться. Второй момент связан с тем, что нормальные внутренние напряжения вызывают появление касательных напряжений на границе между полимером и подложкой. Максимального значения эти напряжения достигают на краях покрытия и на краях трещин. Касательные напряжения ($\tau_{\text{вн}}$) стремятся срезать адгезионные связи и отслоить полимер от подложки.

Таким образом, критерием жизнеспособности являются два условия:

$$\sigma_{\text{прочность}} > \sigma_{\text{вн}} \quad (3)$$

$$\tau_{\text{адгезии}} > \tau_{\text{вн}} \quad (4)$$

Объективными параметрами, способными однозначно характеризовать жизнеспособность покрытия, являются его прочность, прочность адгезионной связи и уровень внутренних напряжений.

Как было показано, внутренние напряжения, развивающиеся в покрытии, пропорциональны модулю упругости покрытия, разнице текущей температуры и температуры формирования покрытия, а также разнице ТКЛР покрытия и подложки:

$$\sigma_{\text{вн}} \sim E \times (T_{\text{ф}} - T) \times (\alpha_{\text{п}} - \alpha_{\text{подл}}) \quad (5)$$

Таким образом, имеется три параметра (модуль упругости, температура и ТКЛР), которыми можно управлять. Рассмотрим каждый из них.

Температура

Интервал рабочих температур прибора задается для разработчика техническим заданием. Например, от -50 до $+100$ °C. Проведя сушку при комнатной температуре, а не при $+100$ °C, можно уменьшить $(T_{\text{ф}} - T)$ со 150 °C до 70 °C, то есть всего лишь в 2 раза.

ТКЛР

Уменьшить ТКЛР полимера, приблизив его к ТКЛР подложки (кремний, керамика, медь и т. п.), можно за счет введения в полимер наполнителя с низким значением ТКЛР, например кварцевой муки. Оценить ТКЛР наполненного полимера можно по формуле

$$\alpha_{\text{нп}} = \alpha_{\text{п}} - \delta \times \gamma_{\text{п}} \times (\alpha_{\text{п}} - \alpha_{\text{н}}) / \gamma_{\text{н}} + \delta \times \gamma_{\text{п}}$$

где $\alpha_{\text{нп}}$ — ТКЛР наполненного полимера, $\alpha_{\text{п}}$ — ТКЛР наполнителя, δ — отношение массы наполнителя к массе полимера, $\gamma_{\text{п}}$, $\gamma_{\text{н}}$ — плотность полимера и наполнителя.

Однако при этом следует иметь в виду, что модуль упругости такой композиции повысится, и произведение $E \times (\alpha_{\text{п}} - \alpha_{\text{подл}})$ может как вырасти, так и уменьшиться.

Модуль упругости

Модуль упругости полимера (см. таблицу) можно изменять в очень широких пределах — от 10^9 Па для жестких стеклообразных полимеров до 10^3 Па для низкомолекулярных силиконовых гелей. Очевидно, что за счет замены стеклообразного полимера типа эпоксидной смолы на силиконовый гель величину внутренних напряжений можно снизить с учетом изменения ТКЛР почти на шесть порядков. Здесь следует отметить, что для упрощения не учитывается зависимость модуля упругости полимеров от температуры.

Таким образом, можно сделать следующие рекомендации по использованию полимерных материалов для защиты и герметизации РЭА:

1. Стеклообразные полимеры типа эпоксидных смол необходимо применять там, где они используются как конструкционные. При этом желательно, чтобы в состав композиции входил наполнитель с низким ТКЛР. Понятно, что тензочувствительные приборы защищать такими полимерами нельзя.

2. Компаунды на основе каучуков можно применять там, где покрытие не будет подвергаться механическим воздействиям. Для минимизации внутренних напряжений следует использовать силиконовый гель.

Силиконовый гель является идеальным материалом для защиты РЭА. Помимо низ-

кого внутреннего напряжения в широком интервале температур (от -60 до $+170$ °C) силиконовый гель позволяет повысить стойкость изделия к ударам и вибрации. Кроме того, некоторые силиконовые гели обладают эффектом «самозалечивания» и практически все они работоспособны в конструкциях типа «труба в трубе», в которой все остальные полимерные материалы в процессе термоциклирования под действием внутренних напряжений либо растрескиваются, либо отслаиваются от наружной стенки.

Таблица

	Е, Па при 20 °C	α , K^{-1}
Алюминий	$7,2 \times 10^{10}$	24×10^{-6}
Медь	11×10^{10}	17×10^{-6}
Железо	21×10^{10}	12×10^{-6}
Стекло	$6,0 \times 10^{10}$	$8,5 \times 10^{-6}$
Кварц	$5,4 \times 10^{10}$	$0,42 \times 10^{-6}$
Эпоксидная смола	1×10^9	5×10^{-5}
Силиконовый каучук	1×10^6	1×10^{-4}
Силиконовый гель	1×10^3	1×10^{-4}

Таким образом, силиконовые низкомолекулярные композиции (силиконовые гели), по мнению авторов, подтвержденному результатами многолетних испытаний в различных конструкциях, являются наиболее перспективными для защиты корпусных устройств РЭА.