

Наноструктурное защитное покрытие на пластиковой основе без нагрева для печатных плат: технология, характеристики и вопросы надёжности

Аннотация

Печатные платы (PCB) в автомобильной, промышленной, морской, уличной и влажной средах подвергаются воздействию влаги, воды, ионных загрязнений, коррозии, термоциклирования и механических нагрузок. Эти факторы снижают поверхностное сопротивление изоляции и запускают механизмы отказа: электрохимическую миграцию, рост дендритов и коррозию. Защитные (конформные) покрытия — признанное средство, а рамки **IPC-CC-830** и **IEC 61086** определяют их квалификацию. В статье описано **покрытие на пластиковой основе без нагрева, наносимое слоями (MGCoat)**, образующее усиленный непрозрачный слой при комнатной температуре. Количественные данные приведены как характеристики производителя и наблюдаемые результаты; для формального соответствия рекомендуется независимая квалификация.

Ключевые слова: надёжность PCB; конформное покрытие; защитное покрытие; поверхностное сопротивление изоляции; электрохимическая миграция; IPC-CC-830; IEC 61086; защита при погружении; нанесение без нагрева.

1. Введение

Полевая надёжность электроники определяется устойчивостью к среде. По мере перехода электроники в подкапотные модули, уличные датчики, морское оборудование, светодиодные системы, дроны и

электронику мотоциклов плата сталкивается с конденсатом, дождём, мойкой, солью, пылью, ионными остатками, перепадами температуры и вибрацией. Конформные покрытия снижают эти риски, образуя барьер на плате и помогая сохранить диэлектрическую прочность и долговременную работу [1], [4].

В статье представлено **покрытие на пластиковой основе без нагрева**. В отличие от очень тонких плёнок-изоляторов, система спроектирована как **усиленный наращиваемый слой**, сочетающий экологическую и механическую защиту, с понятным путём к валидации по стандартам.

2. Механизмы отказа плат в эксплуатации

2.1 Влага и ионные загрязнения. Адсорбированная влага с ионными остатками (флюс, соли, загрязнители) снижает **поверхностное сопротивление изоляции (SIR)** между проводниками, вызывая токи утечки, которые смещают рабочие точки и приводят к сбоям [4], [5].

2.2 Электрохимическая миграция и дендриты. Под напряжением и при влаге ионы металла мигрируют и осаждаются в виде проводящих дендритов, замыкающих проводники. Покрытия, ограничивающие плёнки влаги и подвижность ионов, подавляют это.

2.3 Коррозия и САФ. Влага и загрязнения корродируют медь; внутри может образовываться проводящая анодная нить вдоль границы стекло-смола. Оба снижают срок службы, особенно при малом шаге.

2.4 Термические и механические нагрузки. Термоциклирование прокачивает влажный воздух через корпуса, а обращение, вибрация и истирание создают механические нагрузки. Покрытие, добавляющее **механическую прочность после отверждения**, решает оба.

3. Конформные покрытия: функция и классы материалов

Конформные покрытия — тонкие полимерные слои, повторяющие сборку. Основные классы — **акрил, силикон, полиуретан, эпоксид и polyene**, по-разному сочетающие защиту от влаги, механическую и

химическую стойкость, диапазон температур и ремонтпригодность [1], [4]. На практике многие покрытия — ультратонкие прозрачные плёнки для влаги и лёгких загрязнений; они дают мало механической защиты и не скрывают рисунок платы. Это оставляет пробел для применений, где нужны защита от воды и влаги, механическое усиление и конфиденциальность дизайна одновременно.

4. Система покрытия MGCoat

4.1 Концепция материала. MGCoat Liquid PCB Plastic Coating — **непрозрачное покрытие на пластиковой основе**, отверждающееся при комнатной температуре в усиленный слой. Оно рассчитано на **нанесение в несколько проходов**, согласуя толщину и защиту с применением, и поддерживает **окувание, распыление и кисть** для серийного производства и ремонта.

4.2 Характеристики. Ниже — характеристики производителя и наблюдаемые результаты.

Основа / вид	На пластиковой основе, непрозрачное (белый, чёрный или серый)
Метод нанесения	Окувание, распыление или кисть
Температура нанесения	Без нагрева, 15–45 °С (оптимум 25–35 °С)
Первичная сушка	8–10 минут
Полное отверждение (макс. прочность)	12 часов
Толщина за проход	20–200 мкм (норма 50–100 мкм)
Рекомендуемые проходы	2–4, ~10 мин между проходами
Расход	≈ 1 л на 1 м ² при 300–500 мкм
Рабочая температура (после отв.)	от –55 °С до +90...110 °С
Ремонтопригодность	Снимается специальным растворителем
Срок хранения	5 лет (запечатано)

4.3 Методика нанесения и степени защиты. Защита задаётся числом проходов для целевой среды и рабочего напряжения с короткой межслойной сушкой. После нанесения проводится визуальный контроль полного покрытия без воздуха.

Среда	Напряжение	Проходы
Полное погружение в воду	AC 220 В	4
Полное погружение в воду	DC ≤ 24 В	3
Защита от дождя/брызг	AC 220 В	2
Защита от дождя/брызг	DC ≤ 24 В	2

5. Рамки оценки надёжности

Характеристики следует оценивать по признанным рамкам, а не по общему заявлению о «водостойкости». **IPC-CC-830** задаёт квалификацию и соответствие электроизоляционных составов на печатных узлах [1]. **IEC 61086-1** определяет и классифицирует покрытия для смонтированных плат; **IEC 61086-3-1** задаёт спецификации материалов для общих, высоконадёжных и аэрокосмических применений [2], [3]. Методы включают **поверхностное сопротивление изоляции** (IPC-TM-650 2.6.3 [5]), влажность и влаготепло, термоциклирование, адгезию, механическую долговечность, стойкость к загрязнениям и соляному туману, УФ, функциональные тесты после погружения и проверку коротких замыканий.

О заявлениях. Приведённые данные — характеристики производителя и собственные наблюдения, **не** сторонняя сертификация. Для формального соответствия рекомендуется независимая квалификация по IPC-CC-830 / IEC 61086.

6. Сравнительное позиционирование

По сравнению с тонкими прозрачными плёнками система позиционируется как усиленный пластиковый слой с комбинированной защитой. Ключевые отличия:

Параметр	Типичная тонкая плёнка	Покрытие MGCoat
Отверждение	Часто нагрев/УФ или долгое	Без нагрева, комнатная t°
Слой	Очень тонкая плёнка	Усиленный 20–200 мкм, слоями
Механическая защита	Ограничена	Твёрдый, стойкий к истиранию
Контакт с водой	Влага / лёгкие брызги	От дождя до погружения (градации)
Оптика	Прозрачное	Непрозрачное (скрытие дизайна)
Нанесение	Обычно только распыление	Окунание / распыление / кисть
Ремонт	По-разному	Снимается растворителем

7. Ограничения, безопасность и рекомендуемая валидация

Инженерная честность — часть доверия. Продукт **на пластиковой основе и, как большинство пластиков, в жидком виде немного горюч** — жидкость нельзя подносить к открытому огню; после отверждения это стабильная плёнка, работающая до нагрева выше ~120 °C или жёсткой царапины (дрель/лезвие). Водозащита **не заменяет проектирование электробезопасности**: напряжение, ток, зазоры, разъёмы и доступ пользователя оцениваются отдельно. Для глубокого погружения весь узел должен быть герметизирован без воздуха. Характеристики зависят от подготовки поверхности, маскировки и полного покрытия. Для формального внедрения рекомендуются сторонние испытания и документированные данные партий.

8. Заключение

Покрытие на пластиковой основе без нагрева, наносимое слоями, механически усиленное после отверждения, с градациями от защиты от дождя до полного погружения, непрозрачное для защиты дизайна и снимаемое растворителем, — практичный промышленный путь, решающий экологические и механические нагрузки вместе, чего тонкие прозрачные плёнки не дают. В рамках IPC-CC-830 и IEC 61086 и при документированных испытаниях оно подходит для автомобильной, промышленной, морской, светодиодной электроники и беспилотных систем.

Литература

1. IPC-CC-830, *Qualification and Performance of Electrical Insulating Compound for Printed Wiring Assemblies*, IPC.
2. IEC 61086-1, *Coatings for loaded printed wire boards (conformal coatings) — Part 1: Definitions, classification and general requirements*, IEC.
3. IEC 61086-3-1, *Coatings for loaded printed wire boards — Part 3-1: Specifications for individual materials — general purpose, high-reliability and aerospace applications*, IEC.
4. IPC-HDBK-830, *Guidelines for Design, Selection and Application of Conformal Coatings*, IPC.
5. IPC-TM-650, *Test Methods Manual* (e.g., Method 2.6.3, Surface Insulation Resistance), IPC.