

پوشش محافظ نانوساختار قائم بر پلاستیک و بدون حرارت برای بردهای PCB: فناوری، عملکرد و ملاحظات قابلیت اطمینان

چکیده

بردهای مدار چاپی (PCB) در محیط‌های خودروپی، صنعتی، دریایی، فضای باز و پرمطوبت در معرض رطوبت، آب، آلودگی یونی، خوردگی، چرخه حرارتی و تنش مکانیکی‌اند. این عوامل مقاومت عایقی سطح را کاهش می‌دهند و مکانیزم‌های خرابی مانند هجرت الکتروشیمیایی، رشد دندریت و خوردگی را فعال می‌کنند. پوشش‌های محافظ (Conformal) راهکاری شناخته شده‌اند و چارچوب‌هایی مانند IPC-CC-830 و IEC 61086 نحوه ارزیابی آن‌ها را تعریف می‌کنند. این مقاله یک پوشش محافظ قائم بر پلاستیک، بدون حرارت و چندلایه (MGCoat) را شرح می‌دهد که در دمای محیط یک لایه تقویت شده و غیرشفاف می‌سازد. اعداد به صورت مشخصات سازنده و نتایج مشاهده شده بیان شده‌اند؛ برای انطباق رسمی، آزمون مستقل توصیه می‌شود.

کلیدواژه‌ها: قابلیت اطمینان PCB؛ پوشش مطابق؛ پوشش محافظ؛ مقاومت عایقی سطح؛ هجرت الکتروشیمیایی؛ IPC-CC-830؛ IEC 61086؛ حفاظت غوطه‌وری؛ اجرای بدون حرارت.

۱. مقدمه

قابلیت اطمینان میدانی الکترونیک با میزان تحمل آن در برابر تنش محیطی تعیین می‌شود. با ورود الکترونیک به ماژول‌های زیر کاپوت، سنسورهای فضای باز، تجهیزات دریایی، سیستم‌های LED، پهپادها و الکترونیک موتورسیکلت، برد با میعان، باران، شست‌وشو، نمک، گردوغبار، باقی‌مانده یونی، تغییرات دما و لرزش روبه‌رو می‌شود. پوشش‌های مطابق با ایجاد یک سد روی برد این خطر را کاهش می‌دهند و به حفظ استحکام دی‌الکتریک و عملکرد بلندمدت کمک می‌کنند [1]. [4].

این مقاله یک پوشش محافظ قائم بر پلاستیک که بدون حرارت اجرا می‌شود را معرفی می‌کند. برخلاف فیلم‌های بسیار نازک که عمدتاً عایق سطحی‌اند، این سیستم به صورت یک لایه تقویت شده و قابل ساخت چندلایه طراحی شده که حفاظت محیطی و مکانیکی را با هم دارد و مسیری روشن برای اعتبارسنجی استاندارد محور تعریف می‌کند.

۲. مکانیزم‌های خرابی برد در سرویس

۲.۱ رطوبت و آلودگی یونی. رطوبت جذب شده همراه با باقی مانده یونی (فلاکس، نمک، آلاینده) مقاومت عایقی سطح (SIR) بین هادی‌ها را کاهش می‌دهد و جریان نشتی ایجاد می‌کند که نقاط کاری را جابه‌جا و عملکرد را مختل می‌سازد [4]، [5].

۲.۲ هجرت الکتروشیمیایی و دندریت‌ها. تحت ولتاژ و رطوبت، یون‌های فلزی مهاجرت و به صورت دندریت‌های رسانا رسوب می‌کنند که هادی‌ها را پل می‌زنند و اتصال کوتاه متناوب یا دائم می‌سازند. پوشش‌هایی که فیلم رطوبت و تحرک یونی را محدود می‌کنند این را سرکوب می‌کنند.

۲.۳ خوردگی و CAF. رطوبت و آلودگی مس را می‌خورند؛ در داخل نیز ممکن است رشته آنودی رسانا در مرز شیشه-رزین شکل بگیرد. هر دو عمر را کاهش می‌دهند، به ویژه در طرح‌های ریزپیچ.

۲.۴ تنش حرارتی و مکانیکی. چرخه حرارتی هوای مرطوب را در محفظه‌ها جابه‌جا می‌کند و جابه‌جایی، لرزش و سایش بار مکانیکی وارد می‌کنند. پوششی که پس از خشک شدن استحکام مکانیکی می‌افزاید هر دو را پوشش می‌دهد.

۳. پوشش‌های مطابق: عملکرد و کلاس‌های ماده

پوشش‌های مطابق لایه‌های پلیمری نازکی‌اند که با مجموعه منطبق می‌شوند. کلاس‌های رایج اکریلیک، سیلیکون، پلی‌یورتان، اپوکسی و parylene هستند که هر کدام حفاظت رطوبتی، مقاومت مکانیکی/شیمیایی، محدوده دما و تعمیر را متفاوت متعادل می‌کنند [1]، [4]. در عمل بسیاری از پوشش‌ها فیلم‌های شفاف فوق‌نازک برای رطوبت و آلودگی سبک‌اند؛ حفاظت مکانیکی کمی می‌دهند و پنهان‌سازی بصری ندارند. این خلأیی برای کاربردهایی می‌گذارد که هم‌زمان به حفاظت در برابر آب و رطوبت، تقویت مکانیکی و محرمانگی طراحی نیاز دارند.

۴. سیستم پوشش MGCoat

۴.۱ مفهوم ماده. محصول MGCoat Liquid PCB Plastic Coating یک پوشش محافظ غیرشفاف قائم بر پلاستیک است که در دمای محیط به یک لایه تقویت‌شده تبدیل می‌شود. برای اجرای چندلایه طراحی شده تا ضخامت و حفاظت با کاربرد هماهنگ شود و از غوطه‌وری، اسپری و قلم‌مو برای تولید و تعمیر پشتیبانی می‌کند.

۴.۲ مشخصات. موارد زیر مشخصات سازنده و نتایج مشاهده شده‌اند.

پایه / ظاهر	قائم بر پلاستیک، غیرشفاف (سفید، مشکی یا خاکستری)
روش اجرا	غوطه‌وری، اسپری یا قلم‌مو
دمای اجرا	بدون حرارت، ۱۵ تا ۴۵ درجه (مطلوب ۲۵ تا ۳۵)
خشک‌شدن اولیه	۸ تا ۱۰ دقیقه
خشک‌شدن کامل (حداکثر استحکام)	۱۲ ساعت
ضخامت هر مرحله	۲۰ تا ۲۰۰ میکرون (نرمال ۵۰ تا ۱۰۰)
مراحل پیشنهادی	۲ تا ۴، ۱۰~ دقیقه بین مراحل
پوشش‌دهی	≈ هر ۱ لیتر برای ۱ متر مربع در ۳۰۰ تا ۵۰۰ میکرون
دمای کارکرد (خشک‌شده)	-۵۵ تا +۹۰...۱۱۰ درجه
قابلیت برداشتن	با حلال مخصوص قابل برداشتن
ماندگاری	۵ سال (بلمپ)

۴.۳ روش اجرا و گریدهای حفاظتی. حفاظت به صورت تعداد مراحل برای محیط و ولتاژ کاری هدف، با خشک‌شدن کوتاه بین مراحل، مشخص می‌شود. پس از پوشش، به صورت بصری پوشش کامل و بدون هوا تأیید می‌شود.

محیط	ولتاژ	مراحل
غوطه‌وری کامل در آب	۲۲۰ AC ولت	۴
غوطه‌وری کامل در آب	۲۴ DC ≤ ولت	۳
مقاوم در برابر باران/پاشش	۲۲۰ AC ولت	۲
مقاوم در برابر باران/پاشش	۲۴ DC ≤ ولت	۲

۵. چارچوب ارزیابی قابلیت اطمینان

عملکرد باید با چارچوب‌های شناخته‌شده ارزیابی شود، نه با ادعای کلی «ضدآب بودن». IPC-CC-830 الزامات qualification و conformance را برای ترکیبات عایق روی مجموعه‌های چاپی تعیین می‌کند [1]. IEC 61086-1 پوشش‌های بردهای مجهز را تعریف و طبقه‌بندی می‌کند و IEC 61086-3-1 مشخصات ماده را برای کاربردهای عمومی، قابلیت اطمینان بالا و هوافضا تعیین می‌کند [2]، [3]. روش‌ها شامل **مقاومت عایقی سطح** (IPC-TM-650 2.6.3 [5])، رطوبت و حرارت مرطوب، چرخه حرارتی، چسبندگی، دوام مکانیکی، مقاومت در برابر آلودگی و نم‌پاشی، UV، تست عملکردی پس از غوطه‌وری و بررسی اتصال کوتاه است.

نکته درباره ادعاها. اعداد اینجا مشخصات سازنده و نتایج داخلی‌اند، نه سرتیفیکیت شخص ثالث. برای انطباق رسمی، آزمون مستقل در چارچوب IEC 61086 / IPC-CC-830 توصیه می‌شود.

۶. موضوعیابی مقایسه‌ای

در مقایسه با فیلم‌های شفاف نازک، این سیستم به عنوان یک لایه پلاستیکی تقویت‌شده با حفاظت ترکیبی جایگاه‌گذاری می‌شود. تفاوت‌های کلیدی:

ویژگی	فیلم نازک معمول	پوشش MGCoat
کیورینگ	اغلب حرارت/UV یا طولانی	بدون حرارت، دمای محیط
لایه	فیلم سطحی بسیار نازک	تقویت‌شده ۲۰-۲۰۰ میکرون، چندلایه
حفاظت مکانیکی	محدود	سخت و مقاوم در برابر سایش
تماس با آب	رطوبت / پاشش سبک	از باران تا غوطه‌وری (گریددار)
بصری	شفاف	غیرشفاف (پنهان‌سازی طراحی)
اجرا	معمولاً فقط اسپری	غوطه‌وری / اسپری / قلم‌مو
تعمیر	متغیر	با حلال قابل برداشتن

۷. محدودیت‌ها، ایمنی و اعتبارسنجی پیشنهادی

صداقت مهندسی بخشی از اعتبار است. محصول قائم بر پلاستیک است و مانند بیشتر پلاستیک‌ها در حالت مایع تا حدی قابل اشتعال است — ماده مایع هرگز نباید در معرض شعله قرار گیرد؛ پس

از خشک شدن یک فیلم پایدار است که تا تماس با حرارت بالای ~۱۲۰ درجه یا خراش سخت (دریل/ تیغه) محافظت می‌کند. ضدآب‌سازی جایگزین طراحی ایمنی برق نیست: ولتاژ، جریان، فاصله خزشی/هوایی، کانکتورها و دسترسی کاربر باید جداگانه ارزیابی شوند. برای غوطه‌وری عمیق، کل مجموعه باید بدون هوا آب‌بندی شود. عملکرد به آماده‌سازی سطح، ماسک‌کاری و پوشش کامل بستگی دارد. برای پذیرش رسمی، آزمون شخص ثالث و داده مستند بچ توصیه می‌شود.

۸. جمع‌بندی

یک پوشش قائم بر پلاستیک، بدون حرارت و چندلایه که پس از خشک شدن از نظر مکانیکی تقویت شده، از مقاومت در برابر باران تا غوطه‌وری کامل گریدبندی شده، برای حفاظت طراحی غیرشفاف است و با حلال قابل برداشتن است، یک مسیر صنعتی کاربردی ارائه می‌دهد که تنش محیطی و مکانیکی را با هم پوشش می‌دهد — خلأیی که فیلم‌های شفاف نازک کامل پر نمی‌کنند. با جایگاه‌گذاری در چارچوب‌های IPC-CC-830 و IEC 61086 و پشتیبانی آزمون مستند، برای الکترونیک خودرو، صنعتی، دریایی، LED و سیستم‌های بدون سرنشین مناسب است.

منابع

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