



Electronic Design[®] LIBRARY

Авторське право © 2023 належить Endeavor Business Media.
Всі права захищені.

Збірник статей з ресурсу Electronic Design

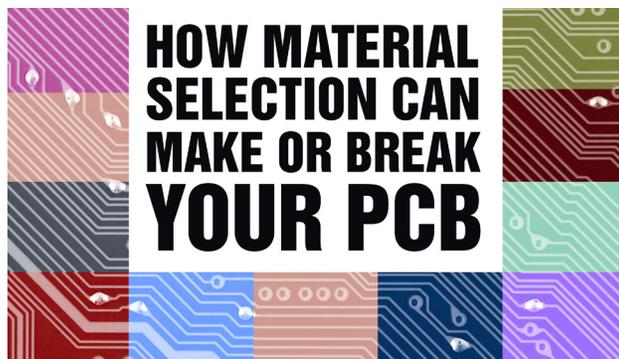
Переклад та підготовка ЛЕМ Україна

Під спонсорством

Waters[™] |



ЯК ВИБІР МАТЕРІАЛУ МОЖЕ ВИЗНАЧАТИ АБО ЗІПСУВАТИ ВАШУ ДРУКОВАНУ ПЛАТУ



Під спонсорством Waters™ | TA Instruments

ВСТУП

ДРУКОВАНІ ПЛАТИ (ДП) є домінуючими в електроніці, починаючи від дрібних друкованих плат у смарт-годинниках до масивних друкованих плат, що використовуються в хмарних серверах. Але не всі друковані плати однакові. Розробникам необхідно враховувати різноманітні фактори, включаючи виробничі стандарти, вплив матеріалів на продуктивність та умови застосування. В цій електронній книзі висвітлено багато з цих питань і надано пояснення в деталях: від затвердіння епоксидної смоли до міфів про саму галузь.



Білл Вонг (Bill Wong)
 Редактор,
 старший директор з контенту,
 електронного дизайну та MWRFB

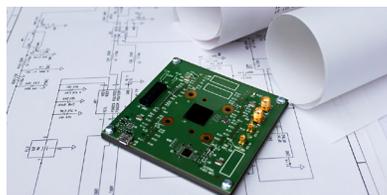
ЗМІСТ



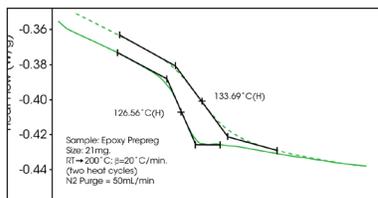
02 РОЗДІЛ 1
 11 міфів про індустрію друкованих плат



07 РОЗДІЛ 2
 Речові докази: Як властивості ламінації впливають на процес проектування друкованих плат



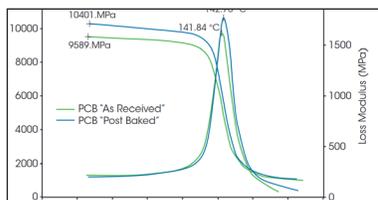
14 РОЗДІЛ 3
 Стандарти IPC для друкованих плат: Що вони собою являють і чому вони важливі?



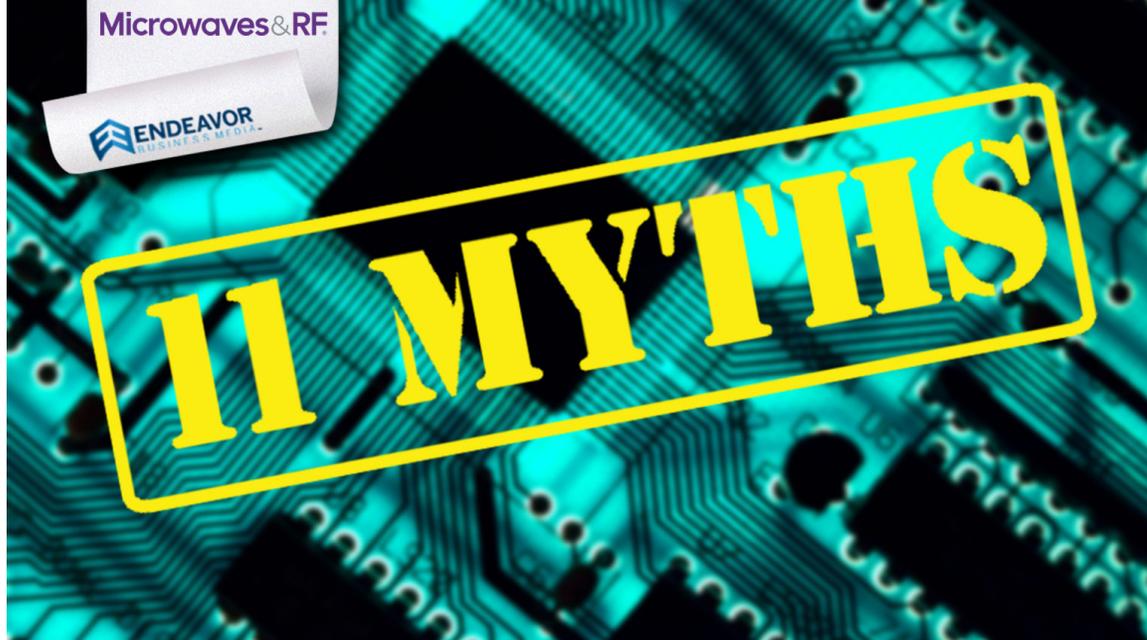
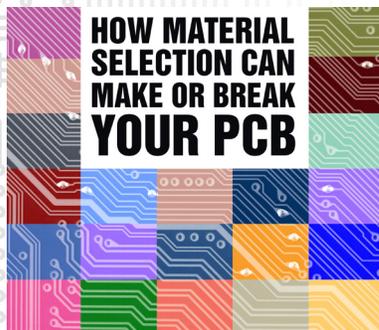
17 РОЗДІЛ 4
 Характеристика епоксидних препрегів за диференціальною скануючою калориметрією



18 РОЗДІЛ 5
 Одночасні реологічні та діелектричні вимірювання затвердіння епоксидної смоли



24 РОЗДІЛ 6
 Характеристика матеріалів друкованих плат за DMA



Dreamstime: Colicarantica

РОЗДІЛ 1:

11 міфів про індустрію друкованих плат

КЕЛЛА НЕК (KELLA KNACK), директор зі стратегічного маркетингу, *Avishtech*

Сучасні високошвидкісні та високочастотні конструкції створюють нові виклики для проектування друкованих плат.

Друковані плати (ДП) існують так довго, що розробники продуктів часто вважають їхню конструкцію, технологічність та надійність «очевидними». Є широко поширена думка, що цінність будь-якого сучасного електронного продукту визначається компонентами, встановленими на платі, та програмними застосунками, вбудованими в ці компоненти. Однак, сучасні високочастотні пристрої з високою швидкістю передачі даних ставлять під сумнів ці давні припущення, тому успішне впровадження друкованих плат знову стало одним з ключових моментів у загальному процесі розробки продукту. Нижче наведено деякі поширені міфи, пов'язані з розробкою плат.

1. Друковані плати є товарами і по суті вони є лише «носіями» для встановлених на них мікросхем.

Так, це правда. Протягом тривалого часу друковані плати не викликали великого занепокоєння. Різні аспекти технології та матеріалів плати мали багато «простору для маневру» в тому сенсі, в якому відігравали роль в загальній конструкції кінцевого продукту, тому часто було достатньо «відносно правильно» спроектувати друковану плату. Але, коли ми почали рухатись вгору по кривій швидкості (починаючи приблизно з 2,5 Гбіт/с), будь-яка грань на помилку в проектуванні плати зникла. У міру того, як ми піднімаємося далі по кривій, така свобода для створення плати, яка працює правильно з першого разу і кожного разу після першого разу, зменшується.

Зараз, з сучасними високочастотними конструкціями з високою швидкістю передачі даних, толерантність до будь-яких помилок фактично зникла. Важливіше ще те, що з сучасними деталями з малим кроком немає жодних «реконструкцій». Якщо ваша плата не працює, ви втрачаєте не лише її. Ви також втрачаєте деталі, які можуть коштувати десятки тисяч доларів. Крім того, існує ймовірність втрати доходу внаслідок запізнення виходу на ринок або недостатнього терміну служби для забезпечення довгострокового доходу та прибутковості.

2. Процес проектування друкованої плати дуже простий.

Звичайно, деякі електронні пристрої не потребують складної конструкції плати (більше восьми шарів). Але для сучасних високочастотних продуктів з високою швидкістю передачі даних друковані плати є критично важливою основою,

на якій будуються всі інші вимоги до розробки дизайну. На рисунку 1 зображено типовий процес проектування та виготовлення. Як показано, проектування та виготовлення друкованих плат є багатоетапним процесом, в якому можуть виникати помилки на будь-якому етапі.

Уявіть собі це з точки зору будівництва будинку. Фундамент може спочатку виглядати добре, але якщо його не спроектувати та не побудувати з самого початку, будівництво на ньому може призвести до катастрофічного руйнування всієї конструкції.

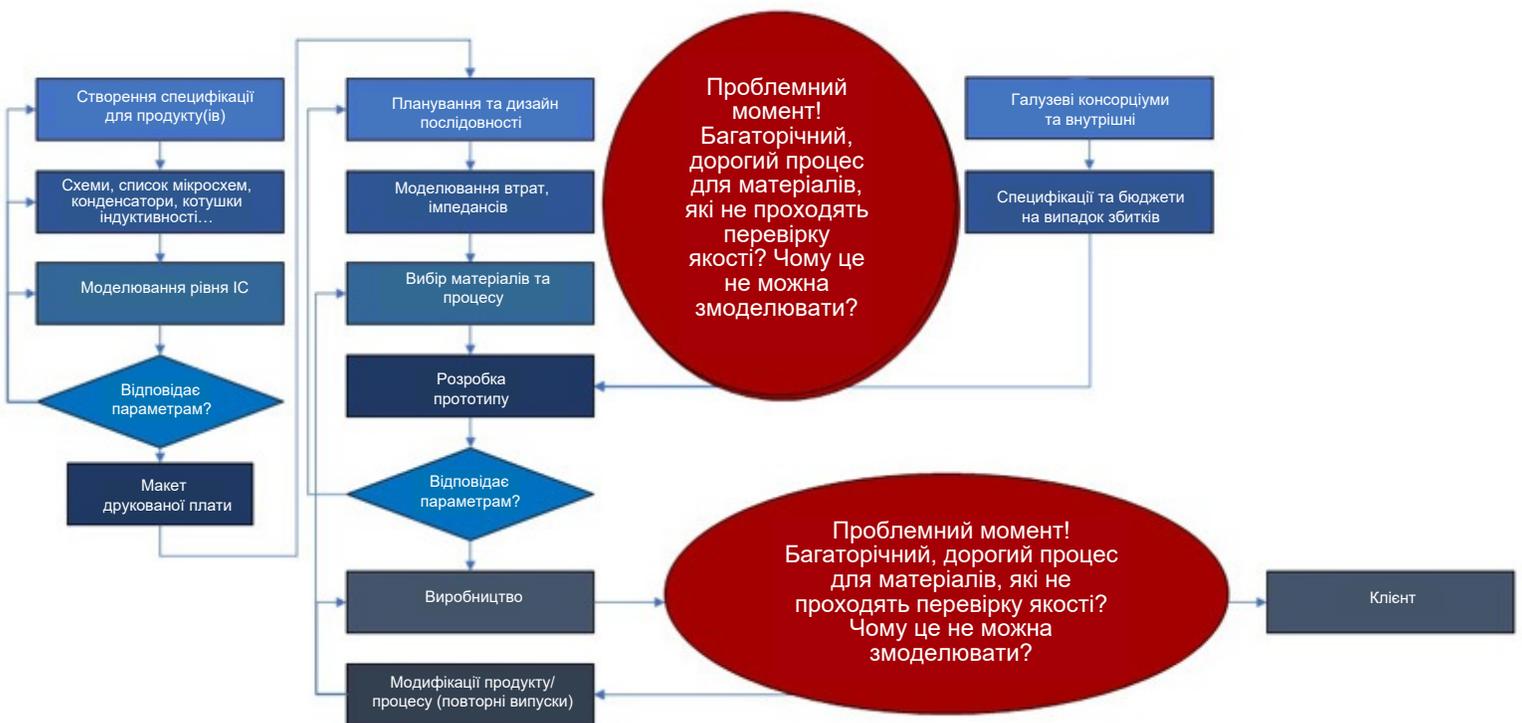
3. Друковані плати не сприяють загальній роботі кінцевих продуктів, до складу яких вони входять.

У складних конструкціях дизайн друкованої плати та характеристики компонентів ламінату відіграють величезну роль продуктивності кінцевого продукту. Три основні характеристики ламінату, які впливають на дизайн, технологічність, надійність та термін служби виробу, — це імпеданс, втрати та перекис.

Однак кожна з цих характеристик має підмножини і в кінцевому підсумку щонайменше 10 різних характеристик матеріалу враховуються під час розробки високочастотної конструкції з високою швидкістю передачі даних. Ігноруйте їх на власний страх і ризик — будь-якого з них може бути достатньо, щоб зіпсувати всю конструкцію вашого продукту.

4. Інструменти АЕП (автоматизації електронного проектування) роблять конструкцію друкованих плат процесом «натискання кнопки».

Наприкінці 1980-х та на початку 1990-х років безліч постачальників інструментів АЕП переконували своїх клієнтів, що певний набір інструментів проектування (або комплекс інструментів) може автоматизувати процес проектування друкованих плат. Наприклад, постачальники пристроїв АЕП часто вихвалялися тим, що їхні набори інструментів проектування можуть автоматично трасувати 90% заданого проекту друкованої плати. Можливо, але не було сказано, що останні 10% маршрутизації це часто було найскладнішим і найзатратнішим за часом у роботі.



1. Це типова блок-схема проектування та виготовлення друкованої плати з виділеними критичними проблемними точками.



Інша частина маркетингової мантри постачальників АЕП полягала в тому, що набір інструментів проектування від одного постачальника задовольнить усі ваші потреби в проектуванні друкованих плат. Але досвідчені інженери знали, що нерозумно залишати розробку друкованої плати набору інструментів АЕП.

Швидше, вони розуміли, що успішне проектування технологічних та надійних друкованих плат найкраще досягається за допомогою оптимізованих точкових інструментів. Навіть сьогодні інженери, які досягають найбільшого успіху у своїх високочастотних конструкціях з високою швидкістю передачі даних, обирають ті точкові інструменти, які, як вони знають, найімовірніше, дозволять реалізувати їхній цільовий, повністю функціональний та завершений проект.

Крім того, інструменти для друкованих плат часто були «нелюбимими дітьми» в наборі або сімействі інструментів АЕП. Основна увага давно зосереджувалася і продовжує зосереджуватися на компонентах, їхніх характеристиках та тому, як найкраще використовувати їх у конструкції. Інструменти для друкованих плат у наборах інструментів певного постачальника часто надходять шляхом корпоративного придбання. І хоча їхня продуктивність, можливо, була достатньою на момент цього придбання, у довгостроковій перспективі вони можуть не встигати за новими дизайнерськими викликами.

5. Важко мати уявлення про процес виготовлення під час проектування друкованої плати.

Хоча це твердження було правдивим і в минулому, є постачальники інструментів АЕП, які тісніше пов'язують процеси проектування та виробництва друкованих плат. Під час виробничого процесу враховуються кілька факторів і наборів даних, які можуть впливати на процес проектування плати. Серед них – вміст смоли, стабільність розмірів та скляне переплетення.

Найбільшим викликом є навчання дизайнерів тим аспектам виробничого процесу, які можуть вплинути на їхні проекти. Для цього нам потрібна більша синергія між процесами проектування та виготовлення, а також більший обмін інформацією про ті аспекти виробництва друкованих плат, які можуть створювати приховані «підводні камені» в кінцевих продуктах.

6. Багаторазове повторне виготовлення друкованих плат є прийнятним способом розробки продукту.

Насправді, це твердження є не стільки міфом, скільки «традиційним» способом ведення бізнесу в галузі друкованих плат. У минулі десятиліття єдиним способом перевірити дизайн друкованої плати було виготовлення прототипу для монтажу елементів та тестування. Якщо виникали проблеми, це означало повернення до початкового етапу. Цей процес повторювався знову і знову, доки не з'явилася робоча друкована плата.

Ще гірше, іноді, здавалося б, правильно розроблена плата виготовлялася масово, але деякі або навіть усі з них виходили з ладу в кінцевому продукті. Результатом такої небезпеки стали високі одноразові витрати на проектування, втрата часу виходу на ринок та втрата конкурентних переваг, що призвело до зниження прибутків. Таким чином, галузь прийняла багаторазові повторні виготовлення плати як стандартну операційну процедуру. На жаль, багато виробників оригінального обладнання досі погоджуються на багаторазове виготовлення друкованих плат як частину витрат на ведення бізнесу. Такий спосіб мислення може з самого початку запровадити в процесі розробки продукту уявлення про те, що повністю оптимізований дизайн плати є недосяжним. В результаті, процес розробки друкованих плат часто проходить без необхідної уваги чи ретельного контролю.

7. Проектування друкованих плат, що використовуються в сучасних високочастотних конструкціях з високою швидкістю передачі даних, має велику «свободу дій».

Справа в тому, що сучасні високочастотні продукти з високою швидкістю передачі даних залишають дуже мало місця для свободи дій в процесі проектування друкованих плат, особливо в сфері послідовності плат.



У застосуваннях зі швидкістю для каналів 112 Гбіт/с та застосуваннях 5G, де довжина хвилі мм-діапазону, навіть незначна помилка може швидко зробити конструкцію непридатною або непридатною для виробництва.

Повний проект збільшення - це проект, який включає повністю інтегровані електромагнітні та термомеханічні симуляції. Технічно правильний та фінансово оптимізований підхід до проектування – це той, який дозволяє точно прогнозувати проблеми з висиханням смоли та проблему з скляним штапиком, а також забезпечує термомеханічні властивості на рівні плати, включаючи коефіцієнти теплового розширення у всіх напрямках – по осях X, Y та Z (як вище, так і нижче Tg). Маючи цю інформацію, розробник може точніше передбачити надійність та продуктивність плати.

8. Окрім діелектричної проникності (Dk) та низьких втрат (DF), немає багато інформації про те, як інші характеристики матеріалу впливатимуть на друковану плату.

Хоча це й могло бути в минулому, але сьогодні це більш зрозуміло, особливо з розвитком високочастотних конструкцій з високою швидкістю передачі даних. Хоча наявність більшої інформації завжди добре, здатність надавати сенс інформації стає вирішальним фактором у цьому процесі.

9. Інформація про матеріали, надана постачальниками ламінату, є повною.

Інформація про Dk та DF вже давно доступна від постачальників ламінату і загалом ця інформація є достовірною та досить повною. Завдання полягає в поширенні інформації за межі цих двох властивостей.

Механічні властивості як функція конструкції не були доступні. Фактично, кожна послідовність має різні властивості, навіть якщо вона побудована з одного й того ж матеріалу, і це може мати серйозні наслідки для технологічності та надійності плати. Часто для кваліфікації певного матеріалу використовуються сполучна речовина для випробування матеріалів, але кожна система послідовності може поводитися зовсім інакше, ніж сполучна речовина для випробування.

Характеристики, показані на рисунку 2, виходять далеко за рамки типової інформації про Dk та DF, яку зазвичай надають постачальники матеріалів. Всі вони можуть вплинути на остаточну конструкцію, технологічність та довгострокову надійність друкованої плати.

Перевірка властивостей матеріалів

| Властивість матеріалу | Символ | Експериментальне вимірювання | Прогнозування стека за Гаусом |
|-------------------------------------------------------|----------------|------------------------------|-------------------------------|
| Коефіцієнт теплового розширення в напрямку Z нижче Tg | $\alpha (Z_1)$ | ~72 PPM / °C | 75.57 PPM/°C |
| Коефіцієнт теплового розширення в напрямку Z вище Tg | $\alpha (Z_2)$ | ~290 PPM / °C | 279.57 PPM/°C |
| Коефіцієнт теплового розширення в напрямку X та Y | $\alpha (X)$ | ~20 PPM / °C | 20,51 PPM / °C |
| Модуль Юнга (напрямок X) | E_x | 20,56 ГПа | 21,565 ГПа |
| Модуль Юнга (напрямок Y) | E_y | 22,06 ГПа | 21,637 ГПа |
| Коефіцієнт Пуассона (ν_{xy}) | ν_{xy} | 0,298 | 0,242 |
| Коефіцієнт Пуассона (ν_{yx}) | ν_{yx} | 0,242 | 0,243 |

Слід зазначити, що всі експериментальні показники мають притаманну мінливість, оскільки вони чутливі до конфігурацій установок, підготовки зразків та діапазону, який використовується для отримання значень. Прогнозування стеків по Гаусу цілком відповідають варіативності вимірювань для цих методів випробувань.

2. Високочастотні конструкції з високою швидкістю передачі даних вимагають додаткових характеристик ламінату, окрім типової інформації про DF та Dk, що надається постачальниками.



10. Не потрібно проходити багато навчання, щоб навчитися використовувати інструменти АЕП, які враховують складні елементи проектування, такі як цілісність сигналу.

Багато інструментів АЕП, що використовуються для вирішення критичних проблем, таких як цілісність сигналу, були складними у використанні та вимагали наявності достатньої кваліфікації для отримання відповідних даних. Оскільки ці набори інструментів не використовуються щодня, інженерам нерідко доводиться «перенавчатися» роботі з інструментом щоразу, коли вони беруться за нову конструкцію друкованої плати.

Вступ у розробку може перевищити терміни розробки продукту. Це також може призвести до появи помилок у процесі, оскільки інженер, який використовує інструмент, не повністю знайомий з його роботою та не знає, коли ставити під сумнів критичні результати.

11. Нові або оновлені інструменти АЕП мають однакову конструкцію та базуються на одній і тій самій внутрішній технології.

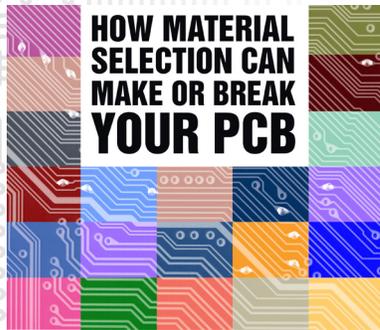
У багатьох випадках перегляд існуючих наборів інструментів проектування або створення нових було зосереджено на додаванні додаткової інформації, часто у формі бібліотек. Хоча більше інформації завжди краще і не всі бібліотеки однакові. Часто важко визначити, які дані є хорошими, а які поганими.

Без можливості маніпулювати даними змістовним чином або використовувати нову конструкцію (наприклад, новий алгоритм чи можливості моделювання) для кращого використання величезного набору інформації в наборі інструментів, переваги, отримані від «переглянутого» або «абсолютно нового» набору інструментів, можуть бути значно меншими за те, що потрібно сучасним розробникам продуктів. Це особливо стосується високочастотних продуктів з високою швидкістю передачі даних.

Крім того, можливість надавати послуги з проектування пристроїв АЕП через онлайн-модель бізнес-планування з оплатою за використання може призвести до створення вискоєфективного та надійного середовища для проектування друкованих плат. Такі підходи задовольняють потреби багатьох розробників друкованих плат, яким не потрібен постійний набір інструментів і не вистачає бюджету для оплати річної підписки на ліцензію «на робоче місце», що є нормальним для багатьох постачальників інструментів АЕП.

переглянути цю статтю онлайн,  [натисніть тут](#)

 [НАЗАД ДО ЗМІСТУ](#)



Dreamstime: RatchanonKlamtawee

РОЗДІЛ 2:

Речові докази: Як властивості ламінату впливають на процес проектування друкованих плат

КЕЛЛА НЕК (KELLA KNACK), директор зі стратегічного маркетингу, *Avishtech*

Для високошвидкісних, високочастотних конструкцій друкованих плат, оцінка та вибір ламінату є критичними факторами для досягнення технологічного, працездатного та надійного продукту.

Численні кроки були зроблені в інструментах і технологіях, що використовуються для проектування, виробництва, складання та тестування друкованих плат. На цьому етапі можна легко припустити, що через довгу історію виготовлення друкованих плат, процес проектування друкованих плат не має жодних серйозних «підводних каменів». Але це не так і вони часто проявляються у фізичних властивостях та експлуатаційних характеристиках ламінату, що використовується для виготовлення друкованих плат.

Зокрема, оскільки ми підвищуємо продуктивність сучасних високошвидкісних та високочастотних застосувань, виникає більша потреба зосередитися на тому, як ці фактори впливають на конструкцію, технологічність, працездатність та надійність продукту. На найвищому рівні, проблеми з ламінатом мають два аспекти:

- Врахування всіх властивостей та характеристик, що виходять за рамки «базових».
- Оцінка проблем, пов'язаних з ламінатом, для вашого продукту та їх вирішення на ранніх етапах процесу проектування.

У цій статті буде розглянуто такі проблеми з надаванням основних рекомендацій щодо процесу оцінки та вибору ламінату. Також тут висвітлюється, які властивості та характеристики можуть вплинути на вашу конструкцію залежно від кінцевого застосування вашого продукту.

Коротка історія вибору ламінату

Протягом дуже тривалого часу вибір матеріалів для друкованих плат обмежувався певною комбінацією епоксидного скла та полііміду, які класифікувалися як ламінати FR-4 та інші класи ANSI. Ці ламінати були робочими конячками галузі і вони досі широко використовуються.

Важливими експлуатаційними характеристиками цих ламінатів були теплові властивості та технологічність і з того часу вони змістилися в бік низької діелектричної проникності (Dk) та тангенса кута втрат (Df).

Однак, хоча ламінати типу FR-4 широко використовувалися навіть у «темні віки» розробки друкованих плат через деякі «маргінальні» застосування, такі як ті, що використовуються у військової авіації або оборонній продукції, вимагали іншого ламінату, про його довгострокову технологічність, працездатність або довгострокову надійність було мало відомо.

Наприклад, коли я кілька років тому був інженером у Martin Marietta (більше, ніж я хочу визнати), кевлар був матеріалом для друкованих плат для програми низьковисотної навігації та цільового інфрачервоного випромінювання вночі (LANTIRN). LANTIRN являв собою комбінацію навігаційних та прицільних капсул, що встановлювалися під крилами винищувачів (наприклад, F-15 та F-16). Таким чином, плати в них повинні були надійно працювати в жорстких умовах експлуатації за високих температур.

Хоча Kevlar відповідав цим умовам навколишнього середовища, ми не знали, що плати на основі Kevlar схильні до «розтріскування, виникнення тріщин та розділення» через процес виробництва. Специфікація виробництва, що застосовується до нашої програми, MIL-P-55110, забороняла ці «дефекти». У свою чергу, всі зусилля різко зупинилися, поки в нас відбувався розширений процес контролю якості, щоб переконатися, що ці косметичні недоліки не вплинуть на роботу та надійність системи з двома капсулами.

У наші дні важко уявити, що будь-які зусилля з розробки продукту могли б витримати такі зупинки, як зазначено вище. Однак наша галузь трансформувалася до такої міри, що ламінат для друкованих плат доведено до межі задоволення сучасних вимог до високої швидкості та надійності. Насправді точніше буде стверджувати, що сучасні друковані плати та ламінати, які використовуються в них, мають дуже малу гнучкість або «похибку» з точки зору їхньої працездатності та надійності.

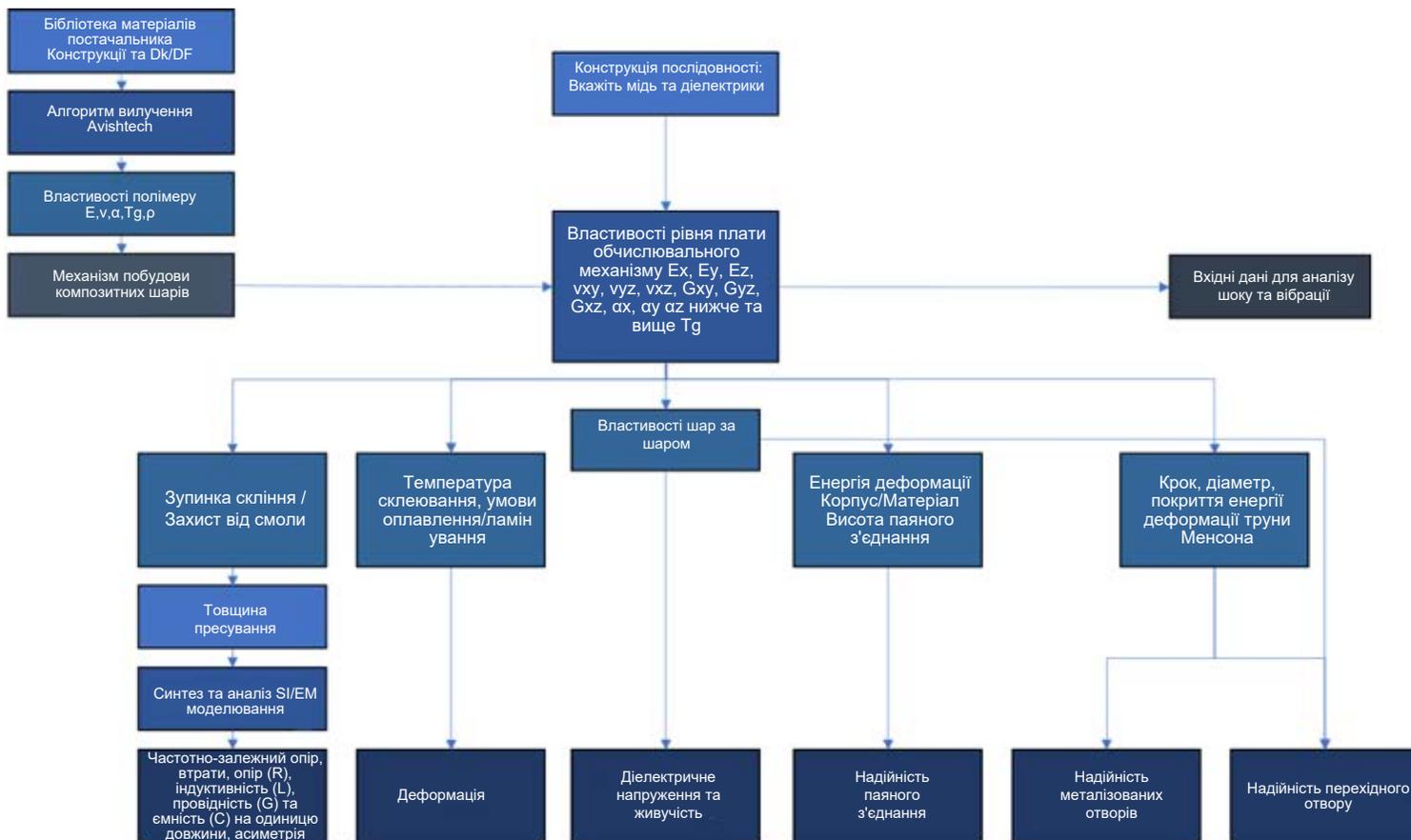
Наразі, поодинокі точки помилок в будь-якому аспекті конструкції, включаючи друковану плату та її структурні компоненти, можуть означати кінець певної конструкції, кінцевого продукту чи програми. І, коли ми обговорюємо важливість ламінату для друкованих плат, необхідно враховувати більш широкі аспекти бізнесу, пов'язані з їх використанням: необхідність перепланування, дорогі разові інженерні витрати, багаторазовий перерозподіл плат, пропущені вікна випуску продукції та зниження норми прибутку.

Що важливо в сучасному висококласному та основному дизайні?

Окрім базових характеристик Dk та Df, зазначених вище, інші, не менш важливі фактори, пов'язані з ламінатом, впливають на функціонування пристрою та його тривалу живучість. До них належать механічні та теплові властивості, такі як жорсткість, коефіцієнти розширення, властивості міді та шорсткість міді. Ці властивості визначають не лише технологічність матеріалів, але й надійність продукту в польових умовах. На рисунку показано робочий процес, який входить до процесу оцінки та вибору ламінату.

У багатьох випадках саме кінцеве застосування та експлуатаційні характеристики продуктів визначають, які властивості ламінату є найважливішими. Для високоякісних плат, що використовуються в маршрутизаторах і серверах, ключовим аспектом є швидкість обробки даних. Для портативних пристроїв, окрім їхніх обчислювальних можливостей, до інших факторів, що викликають занепокоєння, належать їхня здатність витримувати численні падіння, вібрації або високі температури, такі як у салоні автомобіля. Важливо пам'ятати, що всі ці вимоги до експлуатаційних характеристик безпосередньо пов'язані з власними характеристиками та властивостями ламінату, з якого він виготовлений.

Хоча всі вищезазначені фактори відіграють певну роль під час процесу оцінки матеріалів, проблема полягає в тому, що не всі постачальники ламінату проводять необхідні дослідження, щоб визначити, чи відповідатимуть їхні ламінати цим факторам.



Це робочий процес, який входить до процесу оцінки та вибору ламінату, а також елементи, що враховують особливості конструкції.

Типи випробувань, що проводяться

Типи випробувань, які проводять більшість постачальників ламінату, - це випробування формування електропровідної анодної нитки та термічні випробування. Формування електропровідної анодної нитки – це процес, у якому провідні хімічні речовини транспортуються через неметалеву підкладку під впливом прикладеного електричного поля. На цей процес впливають напруга електричного поля, температура (включаючи температуру паяння), вологість, матеріал ламінату та наявність виробничих дефектів. Як буде зазначено пізніше в цій статті, формування провідної анодної нитки часто є причиною збоїв у польових умовах у вологому середовищі.

На прохання виробників автомобілів, деякі постачальники ламінату також проводять випробування на термічні цикли. У таких ситуаціях постачальники оригінального обладнання для автомобілів надають інформацію постачальнику ламінату та зазначають, що «ламінат має бути підданий змінним термічним циклічним умовам, що імітують період від літа в Аризоні до зими в Канаді». Важливо зазначити, що лише деякі постачальники ламінату виконують такий вид циклічних умов.

Елементи ламінату, які мають вплив

Роками раніше, коли «високошвидкісні» кінцеві пристрої працювали на частоті кількох гігагерц, надавалася велика свобода дій щодо впливу властивостей та характеристик ламінату на кінцеві продукти. Натомість зараз, коли ми прагнемо досягнути до 112 Гбіт/с у поточних конструкціях, немає великого простору для маневрування, особливо для вищезгаданих характеристик Dk та Df.

Крім того, втрати для цих високошвидкісних пристроїв надзвичайно низькі і в більшості випадків вони виходять за межі можливостей як ламінату, так і провідного матеріалу, яким є мідь. В результаті, вибір матеріалів та ширина мідних провідників стають дуже критичними.

З ранніми мобільними пристроями на ринок потрапляло багато випадків поганих конструкцій. І багато «помилки», таких як розбиття скла, були залишені на наступний перегляд конструкції для вирішення проблеми.

У критично важливих проектах немає місця для помилок, які можуть призвести до виходу з ладу всієї системи, і неможливо чекати на наступне повторення продукту, щоб вирішити проблему. Таким чином, ці конструкції повинні бути надійними з точки зору їхньої здатності виконувати кілька функцій надійно протягом тривалого періоду часу. Для таких конструкцій необхідно враховувати взаємодію теплових/механічних властивостей, таких як розширення, тангенс, модуль пружності, властивості зсуву та в'язкість руйнування.

Вищезазначене описує ключові елементи виробництва друкованої плати. Однак сам процес виробництва друкованих плат також є дуже вимогливим та виснажливим. Майже у всіх випадках для цього потрібні матеріали, які знаходяться значно вище їх зон пружних деформацій.

Процеси ламінування, свердління та плавлення створюють на ламінат навантаження та деформації, що доводять його до точки розриву. І, зрештою, навіть незначні відхилення можуть призвести до помилок в конструкції. У нашій галузі ми не бачимо показників, порівнянних із шістьма сигмами, і вихід придатних, як правило, становить від 70% до 90%. Якщо ламінат у платі не витримує цих процесів, то ви опинитеся на межі можливого, і конструкція може відвалитися.

Чому не можна покладатися лише на одну точку даних для своєї конструкції

Так само, як ми розглядаємо компроміси в проектуванні друкованих плат між виробництвом, надійністю збірки, випробуванням та вартістю, необхідно дослідити властивості ламінату, щоб побачити, наскільки добре вони поєднуються один з одним. Саме це було основою розробки нашого продукту Gauss Stack. Це дозволяє вам розглянути вплив цих властивостей для даного матеріалу, в даній конструкції та визначити, чи будуть вони добре працювати разом, чи все має рухатися в іншому напрямку.

У деяких високошвидкісних конструкціях, таких як HDI, необхідним є кілька послідовних ламінувань. Отже, окрім низьких Dk та Df, необхідні також низькі рівні STE (коефіцієнт теплового розширення) та висока адгезія, не кажучи вже про термостійкість. Однак, коли ви додаєте щось до ламінатної системи для досягнення низького STE, це негативно вплине на діелектричні властивості та адгезію.

Остаточний вибір ламінату повинен відповідати оптимальному балансу між експлуатаційними характеристиками виробу, здатністю витримувати польові умови та низьким STE. Це тонкий баланс, щоб досягти хорошої конструкції, яка відповідає всім експлуатаційним вимогам та оптимально працює в польових умовах.

Як зазначалося раніше, проблема полягає в тому, що ламінати – це композити, що складаються з полімерів та армуючих елементів, таких як скло та наповнювачі. Ось чому наявності лише однієї точки даних з таблиці даних недостатньо для більшості проектів.

Коли властивості обмежені Dk та Df, дані про механічні властивості (модуль пружності, коефіцієнт розширення та STE) недоступні. Незалежно від того, чи створюєте ви плати з великою кількістю шарів, чи з чотирма або шістьма шарами, ви не можете покладатися лише на одну точку даних для своєї конструкції.

Щоб ще більше ускладнити ситуацію, протягом низки років, і дещо досі, траплялися випадки, коли дані в таблиці даних були неправильними.

Оскільки розробники продуктів можуть не мати досвіду роботи з усіма властивостями та характеристиками певного ламінату, вони не можуть визначити, чи є надана інформація сумнівною. На щастя, ми побачили, що цю проблему досить добре вирішено, оскільки постачальників ламінату звинувачували у наданні неповних або помилкових даних.

Дивлячись у протилежному напрямку деякі постачальники ламінату завищують свої показники Dk та Df. Як тільки розробники продуктів змодельюють свої цифри, вони досягнуть кращих результатів на практиці. Це насправді негативно впливає на постачальника ламінату, але доки вони отримують продажі, вони, як правило, не турбуються про помилки у своїх даних.

Як зусилля з розробки продукту враховуються в порівнянні

Ключова проблема в розумінні взаємодії між властивостями ламінату полягає в тому, як ці взаємодії обробляються під час процесу розробки продукту.

Роками наша галузь характеризувалася роботою людей ізольовано, навіть у межах груп виробників оригінального обладнання. Проекти передаються від електротехнічних конструкторів до механічних. І коли ці групи покладаються лише на інформацію з технічних паспортів матеріалів, це часто зменшує необхідну взаємодію та міждисциплінарний підхід до проектування продукту.

Якщо йти далі, то ті, хто відповідає за розробку продукту, не розуміють, як властивості та характеристики ламінату можуть вплинути на їхній продукт, оскільки вони не бачать цього впливу на своєму рівні.

Це стало джерелом таких практик, як переробка та повторне виробництво, які вбудовані в процес проектування та зазвичай вважаються частиною ціни «ведення бізнесу». Але часто трапляється так, що запуск продуктів може затримуватися, гальмуватися або відкладатися через те, що інформація про ламінат не була належним чином врахована під час процесу проектування.

Ще одним частим явищем є те, що програмне забезпечення та інструменти моделювання мають тенденцію завищувати прогнози щодо продуктивності конкретного ламінату. Це особливо актуально у випадку втрати. Потім, коли трапляються збої, розробники продукту запитують постачальників ламінату, чому їхній ламінат не працює, а постачальник ламінату запитує, чому вони не були залучені до процесу оцінювання на найперших етапах проектування.

Частина проблеми полягає в тому, що значна частина діяльності з розробки продукту здійснюється відділами закупівель. Найкраще це можливо описати як бізнес-модель «витрати проти ціни». Ламінат, обраний за найнижчою ціною, може призвести до найвищої ціни, якщо виявиться, що кінцевий продукт має дефекти або взагалі не працює.

Один із найкращих способів забезпечити технологічність, працездатність та надійність продукту, який ви розробляєте, протягом усього його життєвого циклу – це залучити всіх до процесу проектування. Постачальник ламінату, розробник продукту та виробник однаково важливі. У деяких випадках необхідно також залучати групи складання та тестування.

Верифікація проти валідації

Хоча в галузі доступно кілька хороших програмних продуктів для валідації, єдиний спосіб переконатися, що ваш продукт працюватиме належним чином, як його було розроблено та виготовлено, – це провести перевірку в реальних умовах.

За допомогою нашого програмного забезпечення Gauss ми дозволяємо нашим клієнтам перевіряти різні матеріали та їхні розширені властивості й характеристики. Потім вони переходять до наступного етапу, який полягає у перевірці двох або трьох прототипів. Зрештою, перевірка в реальних умовах — це єдиний спосіб переконатися, що ваша конструкція працюватиме так, як було задумано та виготовлено.

Вищезгадана практика не без своїх труднощів. Через велику секретність навколо нових об'єктів, розробники продуктів не хочуть надсилати свій проект виробнику, який може суттєво порушити цю секретність (як це сталося на деяких офшорних об'єктах). Крім того, перевірка в реальних умовах є дорогою. Виробники можуть вимагати та отримувати сотні тисяч доларів за перевірку конструкції.

Виконання перевірки обчислювальними методами – це чудово, але не завжди доступне як рішення. Крім того, ще однією проблемою є рівень задіяних технологій. Наприклад, якщо ви хочете створити плату з мікропереходами або багат шаровими мікропереходами, існує лише кілька виробничих потужностей, які можуть виконувати такий вид виробництва.

Крім того, такі складні високоякісні конструкції становлять лише від 6% до 7% плат, що виготовляються для всього ринку друкованих плат. В результаті люди будуть проводити перевірку збірки, такої як масовий запуск, та витратити від сотень тисяч до одного мільйона доларів лише на те, щоб їхній продукт був перевірений.

На жаль, якщо ви не вжили необхідних заходів для забезпечення технологічності вашої конструкції, ви зрештою повернетесь до початку. Точне налаштування процесу перевірки, під час якого ви звужуєте вибір до двох або трьох прототипів, є найефективнішим способом досягнення реальної, перевіреної конструкції.

Інші виклики

Врахування всього вищезазначеного може бути недостатньо, коли йдеться про властивості та характеристики матеріалів. Одним з найбільших впливів на тип ламінату є старіння матеріалу. Коли відбувся перехід на технологію без використання свинцю, майже одразу на ринку з'явилася велика кількість матеріалу. Лише пізніше стало зрозуміло, що матеріал погано справляється з вологістю. Формування провідної анодної нитки – це класичний приклад того, що може статися з часом і призвести до збоїв у процесі експлуатації.

Зрештою, те, що поглинає вологу, з часом руйнується. Ви можете виконувати роботу з перевірки цілісності сигналу з чистим сухим матеріалом, який чудово працює в сухому середовищі. Тоді, коли виріб працює в гарячих, вологих умовах в якомусь іншому середовищі, матеріал з часом деградує, і виріб не працюватиме належним чином або не працюватиме взагалі.

Знову ж таки, врахування всіх характеристик продуктивності проекту з точки зору його властивого функціонування, а також середовища, в якому він буде функціонувати, значною мірою забезпечує його правильну роботу.

Чому конструкція стеку так важлива

Одним з ключових зусиль, пов'язаних з будь-яким успішним проектуванням друкованої плати, є створення дійсно гарного стеку. На жаль, його необхідності та точності часто приділяється недостатньо уваги. Здавалося б, нешкідливі зміни в шарі препрега або стеку, або заміна одного ламінату іншим з вищим або нижчим вмістом смоли, можуть призвести до деформації, зробити плату непридатною для виробництва або призвести до проблем з формуванням провідної анодної нитки.

Нещодавно ми стали свідками конструкції, в якій тип скла в ламінаті було змінено, що призвело до утворення величезних пустот. У результаті весь продукт був відкладений після двох років розробки. Це був катастрофічний результат, якого можна було б уникнути, якби хтось врахував це на початку процесу проектування.

Розробники продуктів можуть несвідомо вважати, що додавання або видалення шару чи заміна 1 унції міді на 2 унції нічого не змінить, а потім їм залишається тільки дивуватися, чому їхні плати розшаровуються. Приділяючи належну увагу процесу укладання шарів, розуміючи, як конкретні властивості матеріалів впливатимуть на конструкцію, та враховуючи якомога більше наступних процесів на ранніх етапах проектування, ви значною мірою досягнете правильно спроектованого та виготовленого продукту, який також буде прибутковим.

Які фактори слід враховувати у своїй конструкції?

Хоча вплив вибору ламінату залежить від кінцевого застосування вашого продукту, ось деякі основні проблеми, пов'язані з ламінатом, яких вам слід уникнути у своєму кінцевому продукті. Зараз існують технології для проактивного вирішення цих проблем під час створення конструкції стеку.

- Зупинка скління та смоляне голодування
- Заповнювач перегородження
- Надійність наскрізного гальванічного покриття
- Надійність мікропереходів
- Надійність паяних з'єднань
- Діелектрична напруга
- Деформація друкованої плати

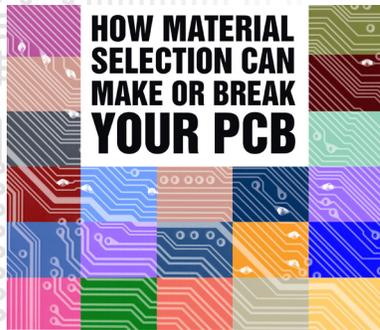
Резюме

Ми пройшли довгий шлях у сфері проектування, технологічності та експлуатаційних якостей друкованих плат. Для тих із нас, хто працює в цій галузі вже давно, кожна нова розробка продукту створює багато труднощів, оскільки ми визначаємо, чи можна розробити кінцевий продукт, використовуючи традиційні підходи до дизайну та матеріали ламінату. Тим не менш, ми над цим працюємо.

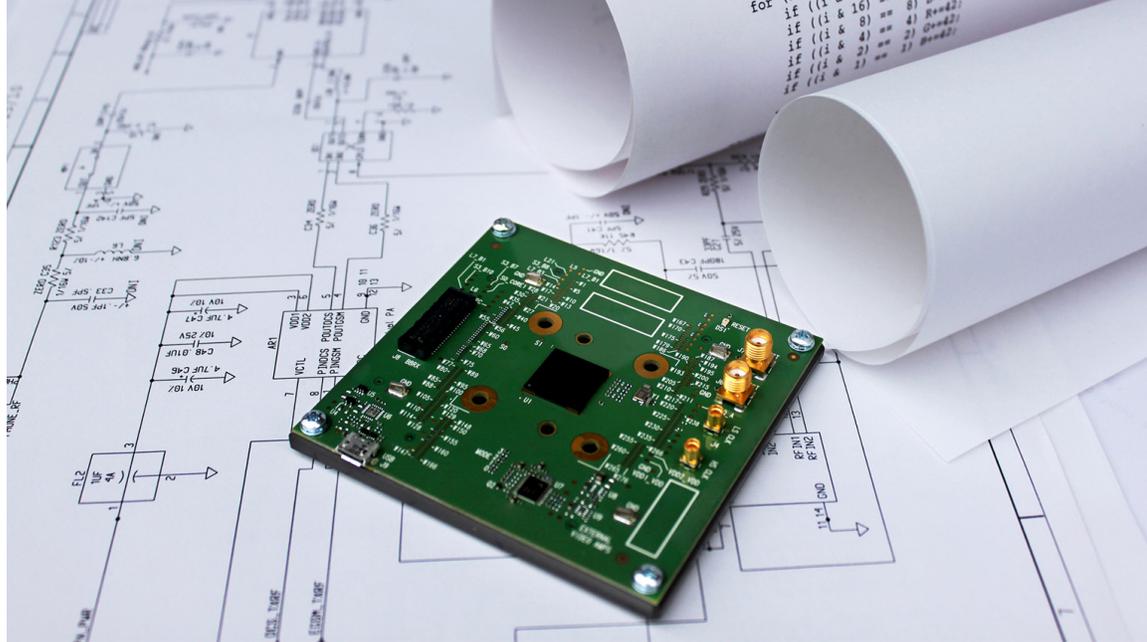
Потім з'являється наступний інноваційний продукт і ми знову починаємо замислюватися, як подолаємо технологічні перешкоди, необхідні для його створення. Це виклик, і це те, що змушує всіх нас вставати вранці.

переглянути цю статтю онлайн,  [натисніть тут](#)

 [НАЗАД ДО ЗМІСТУ](#)



**HOW MATERIAL
SELECTION CAN
MAKE OR BREAK
YOUR PCB**



Dreamstime: Outline205

РОЗДІЛ 3:

Стандарти Інституту друкованих плат (ІДП) для друкованих плат: Що вони собою являють і чому вони важливі?

SURESH PATEL (СУРЕШ ПАТЕЛ), інженер з продажу, *Mer-Mar Electronics*

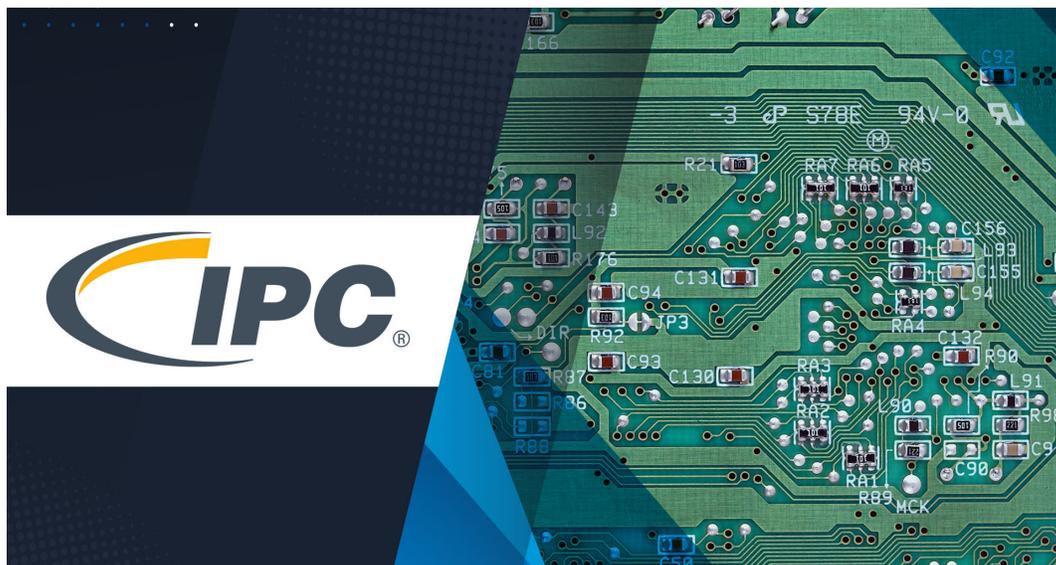
У цій статті розглядаються деякі стандарти виготовлення друкованих плат, яких слід дотримуватися для забезпечення успішного проектування друкованих плат, а також розкриваються деякі переваги стандартів ІДП.

Інститут друкованих плат (ІДП) також відомий як Асоціація, що об'єднує електронну промисловість. Це торгова асоціація галузі електронних взаємозв'язків, яка авторизує високоякісну електроніку, розробляючи стандарти для сприяння успіху світової електронної промисловості. ІДП спочатку було засновано шістьма виробниками друкованих плат у 1957 році і зараз він складається з понад 3000 компаній, які проектують, виробляють та збирають друковані плати для різних застосувань, від побутової електроніки та автомобілебудування до телекомунікацій та охорони здоров'я. Члени ІДП представляють різні аспекти електронної промисловості, такі як виробники оригінального обладнання, [виробники друкованих плат](#), постачальники послуг зі складання друкованих плат та постачальники.

ІДП співпрацює з електронною промисловістю для виявлення галузевих проблем та співпрацює зі своїми членами у наданні відповідних рішень. Він також збирає найновіші дані, пов'язані з галуззю виробництва електроніки, та окреслює відповідні стандарти для найкращих практик.

Стандарти, розроблені ІДП, застосовуються на кожному етапі виробництва друкованих плат, від проектування до виготовлення та остаточного збирання. На різних етапах розробки існують стандарти прийнятності, щоб забезпечити високу якість кінцевого продукту. **Деякі ключові висновки стандартів ІДП включають:**

- Терміни та визначення, що використовуються в стандартах, наведено в документі IPC-T-50.
- Стандарти форматів файлів, документації до продукції та програмного забезпечення для проектування перелічені в серіях IPC-2581 та IPC-2610.
- Конструкція та розміри опорної поверхні охоплені такими стандартами, як IPC-2221, 2222, 2223 та 2226, а також IPC-7351.
- Очікується, що підкладки та базові матеріали для друкованих плат відповідають стандартам, зазначеним у IPC-4101, 4103, 4104, 4202, 4203 та 4204.
- Стандарти якості та надійності друкованих плат викладено в IPC-6011, 6012, 6013, 6017 та 6018.



- Стандарти прийнятності друкованих плат описані в IPC-A-600.
- Критерії вимог до паяних електронних вузлів наведено в IPC-J-STD-001, IPC-HDBK-001 та IPC-AJ-820.
- Стандарти прийнятності для електронних вузлів викладено в IPC-A-601.
- Вимоги та стандарти прийнятності до кабельних та дрютяних джгутів викладені в IPC/WHMA-A-620, IPC-D-620 та IPC-HDBK-620.
- Стандарти прийнятності для виробництва, перевірки та випробування блоків електронного обладнання визначені в стандартах IPC-A-630 та IPC-HDBK-630.
- Також існують стандарти щодо вдосконаленого пакування, зберігання та обробки.

Деякі стандарти ІДП, що стосуються проектування та виробництва друкованих плат, включають:

- IPC-1752A встановлює стандартний формат звітності для заявлених даних матеріалів, якими обмінюються розробники, дистриб'ютори та виробники. Він також підтримує звітність про сипучі матеріали, компоненти, вузли та продукти.
- IPC-2152 визначає вимоги до струмопровідності мідних доріжок та панелей у конструкції друкованої плати.
- IPC-2221 визначає деякі загальні вимоги до проектування та експлуатаційних характеристик друкованих плат та інших методів монтажу компонентів або з'єднання конструкцій.
- IPC-2581 визначає загальну вимогу щодо обміну інформацією між учасниками ланцюга постачання. Він забезпечує стандартний формат для обміну проектними даними, що гарантує надійні результати виробництва.
- IPC-4101 охоплює вимоги до широкого спектру ламінатів або препрегів для друкованих плат, що використовуються для створення стекапів
- IPC-4761 відображає рекомендації щодо проектування захисту переходних отворів для забезпечення надійності, технологічності та якості.
- Серія IPC-A-600 визначає критерії прийнятності для друкованих плат, а також три стандартні класи ІДП для різних збірок друкованих плат:
 - *Клас 1:* Включає побутову електроніку та товари загального призначення, які зібрані за найнижчою можливою ціною та, як очікується, функціонуватимуть протягом встановленого періоду.

- **Клас 2:** До цієї категорії належать такі товари, як ноутбуки або побутова техніка. Це сервісно-орієнтовані продукти з надійністю та тривалим терміном служби.
- **Клас 3:** До цієї категорії належать критично важливі електронні вироби, такі як медичне обладнання та аерокосмічна апаратура. Очікується, що вони працюватимуть безперервно в суворих умовах, що вимагають дуже високої надійності та стійкості. IPC-7351 визначає вимоги до розміру та схеми розміщення компонентів для поверхневого монтажу (КПМ). [Постачальники компонентів](#) для поверхневого монтажу друкованих плат дотримуються цих специфікацій під час проектування посадкових місць, щоб забезпечити процес паяння та надійність електричних з'єднань.

Стандарти ІДП включені до рекомендацій щодо проектування та можуть бути перевірені за допомогою ефективних контрольних списків протягом усього процесу розробки. Зараз клієнти віддають перевагу продуктам, які гарантують безпеку користувача разом із високою продуктивністю. Отже, дотримання стандартів ІДП має засвідчити відмінну якість продукції з друкованою платою.

Переваги, отримані завдяки стандартам ІДП

Стандарти ІДП надають електронній промисловості кілька переваг, таких як:

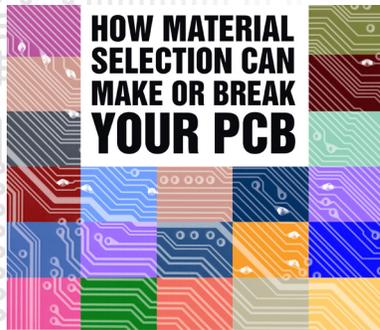
- **Підвищена цінність та стабільність продукту:** Суворе дотримання стандартів ІДП протягом усього процесу розробки та виробництва призводить до отримання високоякісного продукту, що ще більше підвищує його надійність та задоволеність клієнтів. Таким чином, стандарти ІДП сприяють узгодженості та загальній цінності продукту на ринку.
- **Краща комунікація між учасниками:** Коли всі залучені члени дотримуються однакових стандартів ІДП, спілкування між групами стає легшим. Загальноприйнятий жаргон допомагає чітко інтерпретувати встановлені стандарти для кожного результату та уникає будь-якої двозначності під час спілкування.
- **Покращена ідентичність бренду на ринку:** Дотримання стандартів ІДП допомагає підвищити цінність вашого бренду та створити гарну репутацію на ринку. Це свідчить про зобов'язання виробника щодо якості продукції. Це може призвести до більшої співпраці та можливостей для розширення вашого бізнесу.
- **Нижча вартість:** Дотримання стандартів ІДП може допомогти виробнику підвищити ефективність ланцюга поставок, що може ще більше зменшити потреби в ресурсах. І це суттєво знизить собівартість виробництва.
- **Безперебійний робочий процес:** Коли всі члени команди сумлінно дотримуються стандартів ІДП, це також значно зменшує ймовірність збоїв та затримок. Це призводить до безперебійного потоку на лініях розробки, виробництва та складання друкованих плат.

Вищезазначені переваги виправдовують важливість стандартів ІДП для друкованих плат і вони мають значення для будь-якого виробника друкованих плат та контрактного виробника (КВ).

Досвідчений КВ не зосередиться лише на кількох деталях, пов'язаних зі складанням; радше, він інтегрує весь процес з міцною основою, що базується на повному наборі стандартів ІДП. В результаті, КВ може виявити навіть невеликий дефект виробництва друкованих плат на лінії збирання та підвищити продуктивність. Співпраця з досвідченим КВ пропонує ще один шлях до створення високоякісного продукту з друкованою платою.

переглянути цю статтю онлайн,  [натисніть тут](#)

 [НАЗАД ДО ЗМІСТУ](#)



РОЗДІЛ 4:

Характеристика епоксидних препрегів за диференціальною скануючою калориметрією (ДСК)

TA INSTRUMENTS

Зразок епоксидного препрегу
Демонструє зсув температури склування (Tg)
як функцію затвердіння

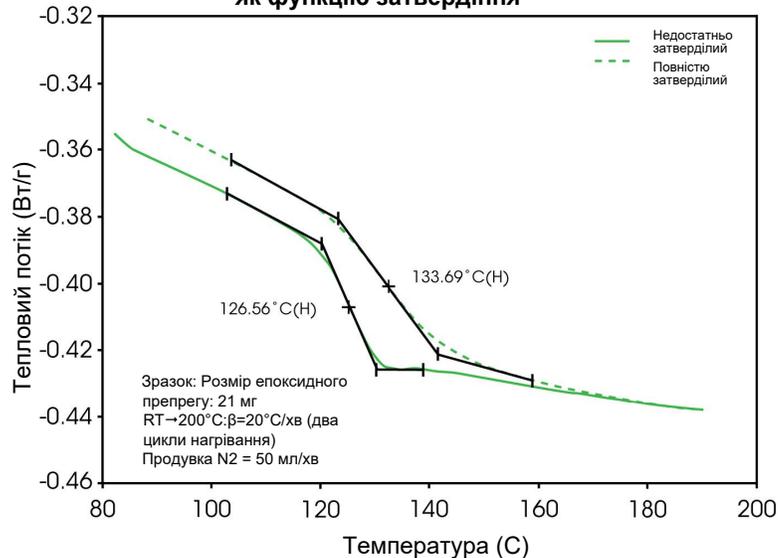


Рисунок 1. Криві теплового потоку зразка епоксидного препрегу, виміряні за допомогою ДСК

Диференціальна скануюча калориметрія (ДСК) вимірює температури та теплові потоки, пов'язані з переходами в матеріалах, як функцію температури або часу в контрольованій атмосфері. Цей метод надає кількісну та якісну інформацію про фізичні та хімічні зміни, що пов'язані з ендотермічними або екзотермічними процесами, або зміни теплоємності. Для аналізу зразка епоксидного препрегу було використано диференціальний скануючий калориметр TA Instruments™. Зразок масою 21 мг нагрівали від кімнатної температури до 200 °C зі швидкістю 20 °C/хв. Використовували два теплових цикли під продувкою азотом.

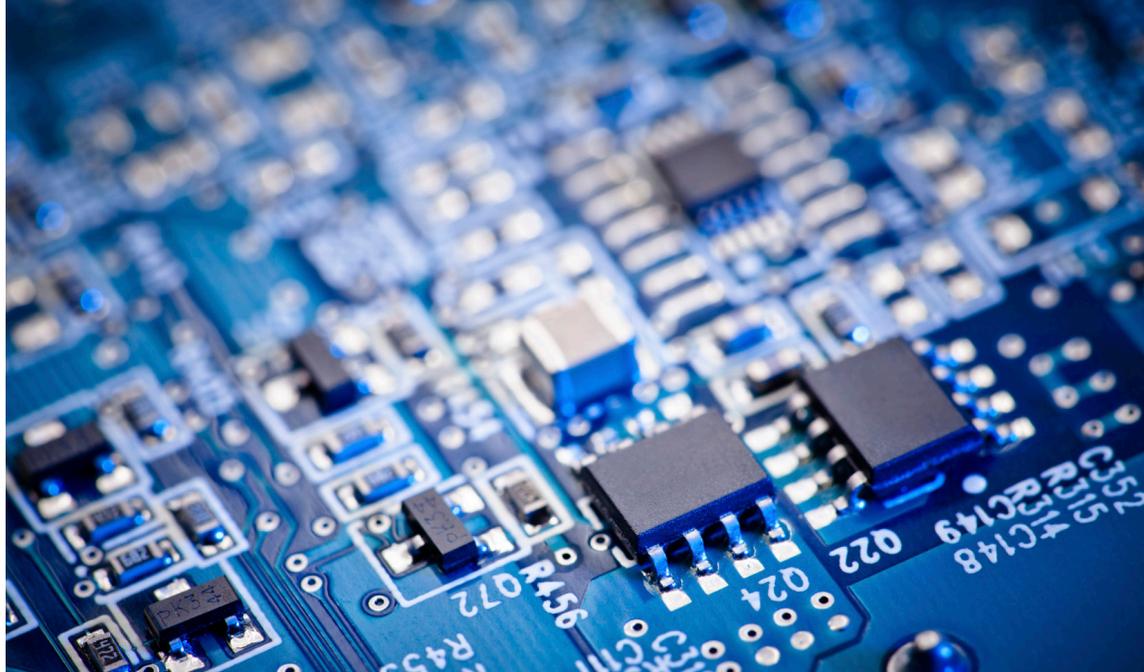
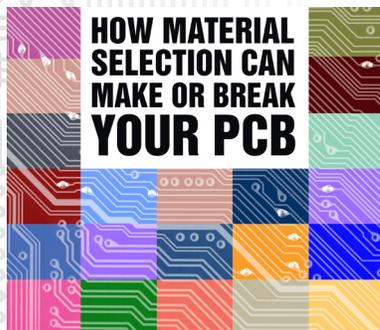
Термічна крива на рисунку 1 показує два цикли нагрівання епоксидного препрегу, який використовується для виготовлення друкованих плат. ДСК легко виявляє зміну температури склування (Tg), що вказує на те, що отриманий зразок не був повністю затверділим. Недостатньо затверділий зразок може вплинути на операції збирання (наприклад, свердління отворів). Цей приклад чітко показує, як диференціальні скануючі калориметри TA Instruments можна використовувати для характеристики матеріалів як у дослідницьких, так і в умовах контролю якості.

Натисніть [тут](#), щоб завантажити версію цього застосування для друку.

Зв'яжіться з нами, щоб дізнатися більше про наші інструменти та про те, як вони можуть бути корисними для ваших досліджень.

переглянути цю статтю онлайн, [натисніть тут](#)

[НАЗАД ДО ЗМІСТУ](#)



РОЗДІЛ 5:

Одночасні реологічні та діелектричні вимірювання затвердіння епоксидної смоли

TIANHONG TERRI CHEN (ТЯНХУНГ ТЕРРІ ЧЕН),

доктор філософії, старший науковий співробітник із підтримки застосувань, TA Instruments.

Анотація

При використанні матеріалу на основі епоксидної смоли в електронній промисловості він повинен відповідати вимогам щодо специфічних діелектричних та реологічних характеристик. TA Instruments пропонує діелектричний аксесуар (DETA), який можна прикріпити до будь-яких ротаційних реометрів TA Instruments. Це дозволяє проводити одночасні реологічні та діелектричні вимірювання з одним завантаженням зразка та в тому ж профілі температури навколишнього середовища. Реометр – це потужний прилад, який може вимірювати зміну в'язкопружних властивостей зразка під час твердіння. Діелектричний вимірювач індуктивності, ємності, опору використовується для моніторингу змін рухливості іонів та диполів у матеріалі. У цьому дослідженні ми детально обговорюємо, як правильно розробити відповідний протокол випробувань для такого виду одночасного вимірювання.

Вступ

Епоксидні смоли та композити на основі епоксидних смол є переважними ізоляційними матеріалами для багатьох електротехнічних застосувань, особливо для друкованих плат, клейових речовин, прокладок елегазового комплектного розподільного пристрою, систем ізоляції заземлювальної стінки генератора та трансформаторів з литої смоли тощо [1-3]. Ці матеріали демонструють чудову механічну міцність, ідеальні електричні властивості, а також добру хімічну стійкість та термостійкість. Кількісне вимірювання діелектричних та механічних властивостей має вирішальне значення для керівництва розробкою та виробництва таких продуктів.

Механічні характеристики продуктів на основі епоксидної смоли можна кількісно оцінити за допомогою реологічного аналізу. Реологія — це потужний інструмент, який вимірює в'язкість та в'язкопружність матеріалу. Для характеристики затвердіння епоксидної смоли зазвичай використовується динамічний коливальний тест, який проводиться або ізотермічним способом, або із запрограмованим температурним профілем, що імітує умови затвердіння у виробництві. Під час коливального випробування модулі пружності зразка (G^* , G' та G''),

Рисунок 1. Гібридний реометр TA Instruments Discovery з діелектричним аксесуаром



комплексна в'язкість (η^*) та коефіцієнт демпфування ($\tan \delta$) записуються як функція частот механічних випробувань з малою амплітудою зсуву, яка знаходиться в межах лінійної в'язкопружної області зразка. Реологічні вимірювання допомагають краще зрозуміти зміну фізичних властивостей протягом затвердіння. Вимірювання модуля пружності для повністю затверділого продукту також забезпечує кількісну оцінку експлуатаційних характеристик кінцевих продуктів.

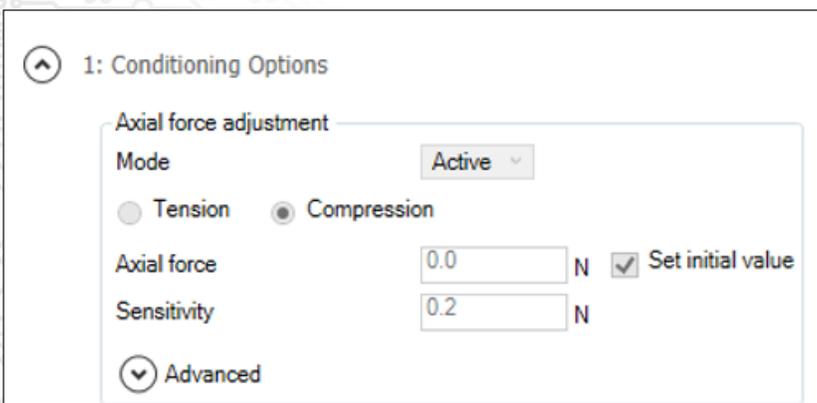
Діелектричний аналіз – це вивчення рухливості диполів або іонів у матеріалі [4]. Під час вимірювання діелектричної міцності можна отримати інформацію про дві основні електричні характеристики: ємність та провідність. Ємність відображає здатність матеріалу накопичувати електричну енергію. Провідність відображає як здатність матеріалу передавати електричний заряд, так і втрату електричної енергії внаслідок процесів релаксації. Ці властивості дозволяють досліджувати хімію та молекулярну релаксацію в таких матеріалах, як епоксидні смоли. Це чутливіший метод, ніж прямий доступ до пам'яті, для зондування локальних рухів вздовж полімерного ланцюга, оскільки на полярні зв'язки впливає електричне поле. Епоксидні смоли є хорошими електроізоляторами завдяки низькій концентрації вільних носіїв заряду. Їхні діелектричні вимірювання можна проводити за допомогою вимірювача індуктивності, ємності, опору за певного температурного профілю та в широкому діапазоні діелектричних частот. Під час вимірювань усі діелектричні параметри, такі як ємність (C), провідність (G), діелектрична проникність (ϵ'), коефіцієнт втрат (ϵ'') та тангенс кута діелектричних втрат ($\tan \delta_{DE}$), записуються як функція часу, температури та діелектричної частоти.

TA Instruments пропонує аксесуар для діелектричних випробувань (DETA), який можна використовувати в поєднанні із загальними реологічними вимірюваннями. На рисунку 1 показано зображення цього діелектричного аксесуара, прикріпленого до гібридного реометра Discover. Ця система дозволяє одночасне вимірювання реологічних та діелектричних властивостей з одним завантаженням зразка та в одному випробуванні.

У цьому дослідженні ми детально розглядаємо, як правильно налаштувати одночасне вимірювання реології та діелектриків для моніторингу процесу затвердіння епоксидної смоли.

Експеримент

Як приклад зразка для цього аналізу було використано один комерційно доступний епоксидний клей, що витримує 60 хвилин. Діелектричний аксесуар (вимірювач індуктивності, ємності, опору Keysight E4980A) був підключений до гібридного реометра TA Instruments Discovery з камерою для випробування навколишнього середовища.



Для випробування використовували пару одноразових алюмінієвих паралельних пластин діаметром 25 мм. Двокомпонентний зразок епоксидної смоли змішували у співвідношенні 50/50 за кімнатної температури, а потім негайно завантажували на пластину, встановлену за початкової температури випробування.

Під час випробування осьове зусилля було встановлено на рівні $0 \pm 0,2$ Н для компенсації усадки зразка під час затвердіння.

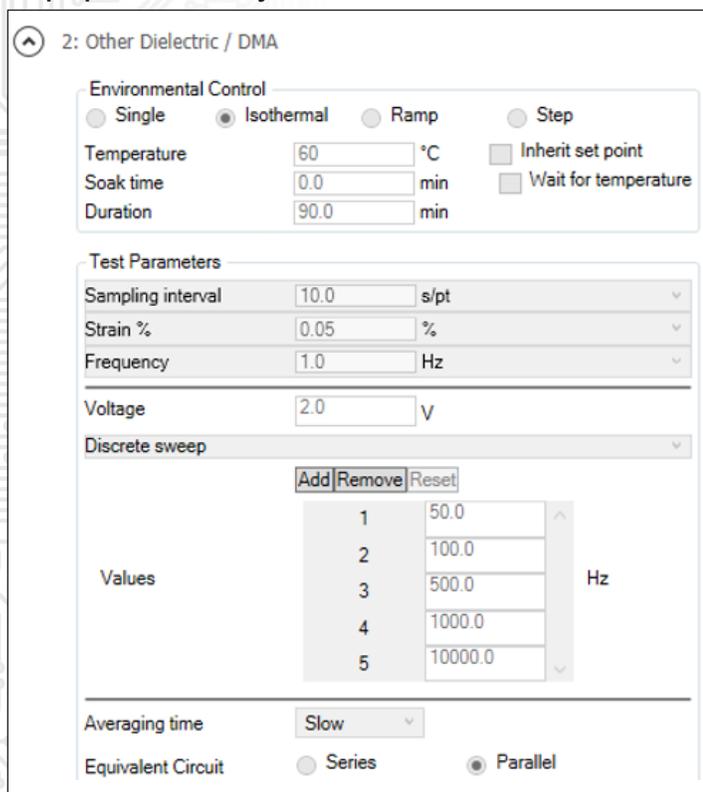
Контроль осьової сили був встановлений на рівні $0 \pm 0,2$ Н для компенсації розширення зразка зі збільшенням температури та усадки під час його затвердіння. Діелектричні частоти були вибрані на рівні 50 Гц, 100 Гц, 500 Гц, 1000 Гц та 10000 Гц відповідно. Оскільки епоксидний матеріал має високий опір, напруга вимірювання була встановлена на рівні 2 В, а еквівалентна плата була з'єднана паралельно.

Результати та обговорення

Під час ізотермічних випробувань за температури 60 °С реометр застосовує до зразка коливальну зсувну деформацію з механічною частотою 1 Гц (6,28 рад/с), а потім вимірює реакцію зразка на напруження. Ці механічні випробування показують модулі пружності зразка (G' та G''), комплексну в'язкість (η^*) та тангенс дельта як функцію часу затвердіння. На рисунку 2а показано результати реологічних випробувань. Час гелеутворення (тобто час переходу G'/G'') цього зразка епоксидної смоли спостерігається на рівні 11,8 хвилини. Через 1 годину криві як модулів, так і комплексної в'язкості досягають плато, що вказує на те, що затвердіння здебільшого завершено.

Одночасно вимірювач вимірювач індуктивності, ємності, опору подає змінний струм на 5 окремих діелектричних частотах (тобто 50 Гц, 100 Гц, 500 Гц, 1000 Гц та 10000 Гц відповідно) (Рисунок 2b).

Випробування на ізотермічне затвердіння було запрограмовано наступним чином:



2: Other Dielectric / DMA

Environmental Control

Single Isothermal Ramp Step

Temperature: 60 °C Inherit set point

Soak time: 0.0 min Wait for temperature

Duration: 90.0 min

Test Parameters

Sampling interval: 10.0 s/pt

Strain %: 0.05 %

Frequency: 1.0 Hz

Voltage: 2.0 V

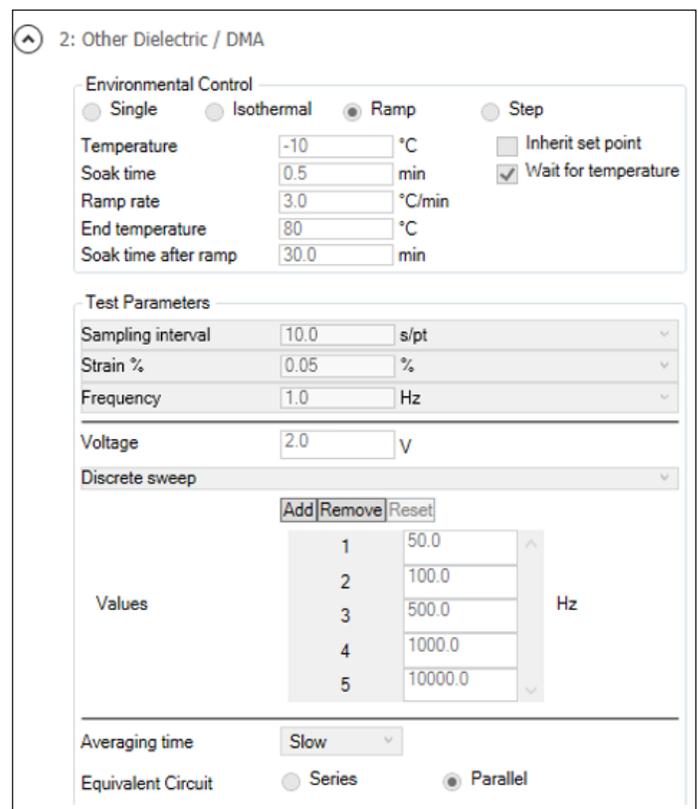
Discrete sweep

| Values | Hz |
|--------|---------|
| 1 | 50.0 |
| 2 | 100.0 |
| 3 | 500.0 |
| 4 | 1000.0 |
| 5 | 10000.0 |

Averaging time: Slow

Equivalent Circuit: Series Parallel

Випробування на полімеризацію зі збільшенням температури було запрограмовано наступним чином:



2: Other Dielectric / DMA

Environmental Control

Single Isothermal Ramp Step

Temperature: -10 °C Inherit set point

Soak time: 0.5 min Wait for temperature

Ramp rate: 3.0 °C/min

End temperature: 80 °C

Soak time after ramp: 30.0 min

Test Parameters

Sampling interval: 10.0 s/pt

Strain %: 0.05 %

Frequency: 1.0 Hz

Voltage: 2.0 V

Discrete sweep

| Values | Hz |
|--------|---------|
| 1 | 50.0 |
| 2 | 100.0 |
| 3 | 500.0 |
| 4 | 1000.0 |
| 5 | 10000.0 |

Averaging time: Slow

Equivalent Circuit: Series Parallel

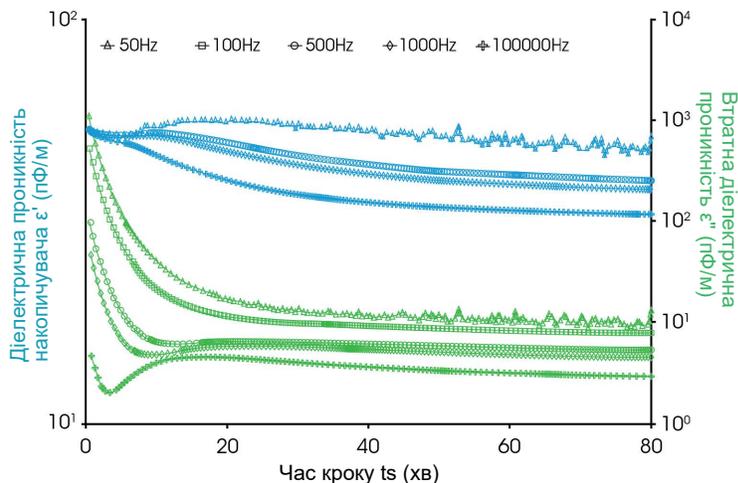
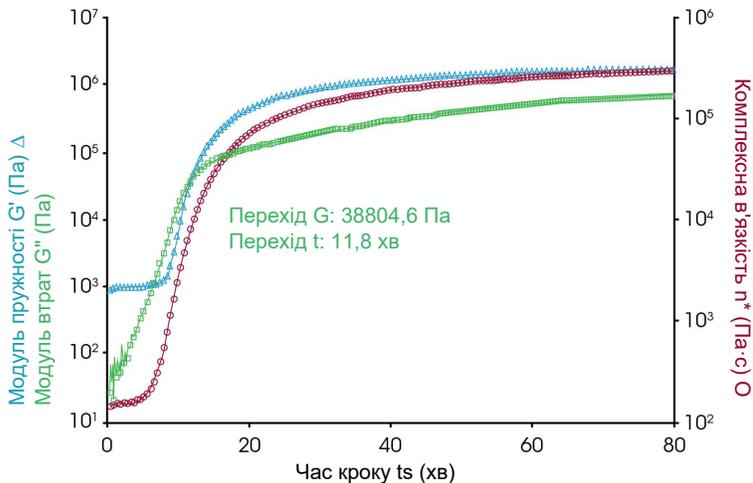


Рисунок 2 (а). Ізотермічне затвердіння при 60 °С – реологічні результати

Рисунок 2 (b). Ізотермічне затвердіння при 60 °С – діелектричні результати

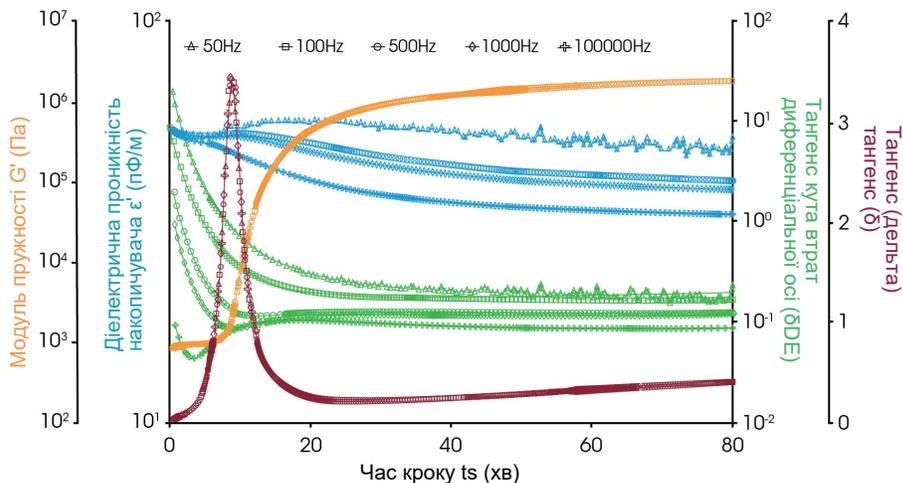


Рисунок 2 (с). Ізотермічне затвердіння при 60°C - накладання результатів

Рисунок 2: Одночасне вимірювання реології та діелектричних характеристик ізотермічного затвердіння епоксидної смоли протягом 60 хвилин при 60°C. (а) Реологічні результати; (b) Діелектричні результати; та (с) Накладання реологічних та діелектричних параметрів.

На початку затвердіння диполі та іони легко рухаються та вирівнюються з полем при зміні полярності завдяки низьким модулям пружності та в'язкості зразка. Відповідно, діелектрична проникність та коефіцієнт втрат накопичення є високими. У міру того, як процес затвердіння триває та утворюються більші молекули, рухливість диполів зменшується, а час релаксації збільшується. Зразок стає більш в'язким, а питомий опір (1/провідність) до вільних іонів збільшується. Отже, зменшуються як діелектрична проникність накопичення, так і коефіцієнт втрат. На рисунку 2с показано графік накладання результатів реологічних та діелектричних вимірювань. Цей графік забезпечує гарну кореляцію між реологічними властивостями та змінами діелектричних властивостей під час процесу затвердіння.

Результати показують, що після гелеутворення зразка механічна міцність зростає, тоді як рухливість диполів та іонів зменшується.

Кількісне вимірювання діелектричної міцності незатверділої смоли допомагає керувати рецептурою епоксидної смоли, а кількісне вимірювання діелектричної міцності кінцевого затверділого матеріалу забезпечує добру оцінку характеристик продукту. Реометрично-діелектрична система може виконувати окремий діелектричний аналіз для незатверділих та затверділих зразків. На рисунку 3 показано результати випробувань на розгортку діелектричної частоти шару незатверділої та повністю затверділої епоксидної смоли. Після повного затвердіння зразка рухливість диполів сильно обмежена, тому як діелектрична проникність, так і коефіцієнт втрат нижчі порівняно з не затверділим зразком.

Окрім проведення ізотермічного аналізу, реометрично-діелектрична система також може контролювати процес затвердіння за допомогою певного температурного профілю. На рисунку 4 показано результати підвищення температури з подальшим ізотермічним профілем затвердіння. Реологічні дані показують, що зразок спочатку має рідинну консистенцію, причому G'' більше, ніж G' . Як модулі, так і комплексна в'язкість зменшуються зі збільшенням температури. Одночасно, збільшення коефіцієнта втрат показує, що рухливість іонів, а диполів вища зі зростанням температури.

Рисунок 3. Діелектричні розгортки частоти зразка епоксидної смоли до та після затвердіння

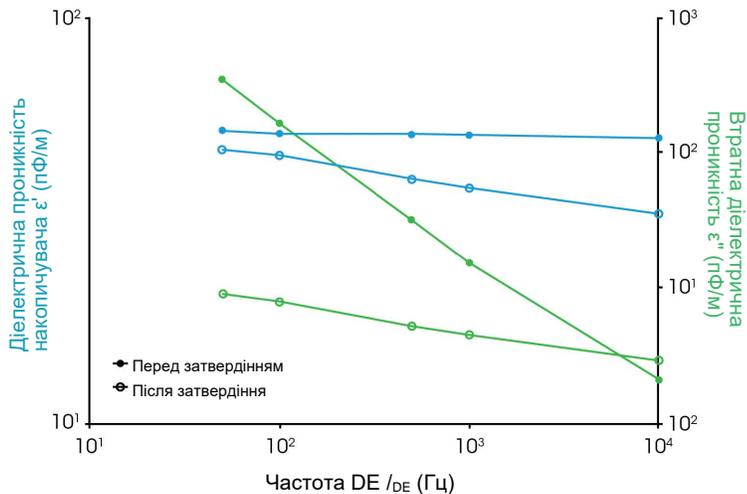


Рисунок 4: Одночасне вимірювання реології та діелектричних характеристик епоксидної смоли протягом 60 хвилин після затвердіння з підвищенням температури та профілем витримки. (а) реологічні результати; та (b) діелектричні результати в залежності від в'язкості.

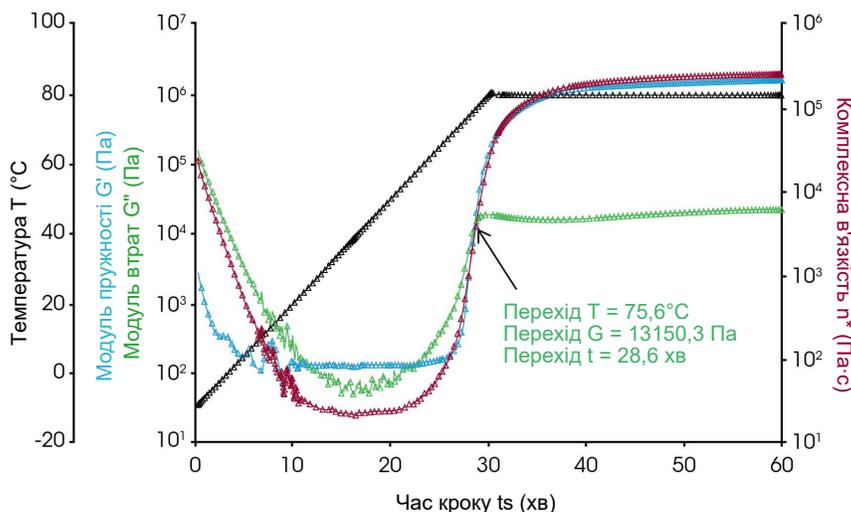


Рисунок 4 (а). Температурне зростання затвердіння - реологічні результати

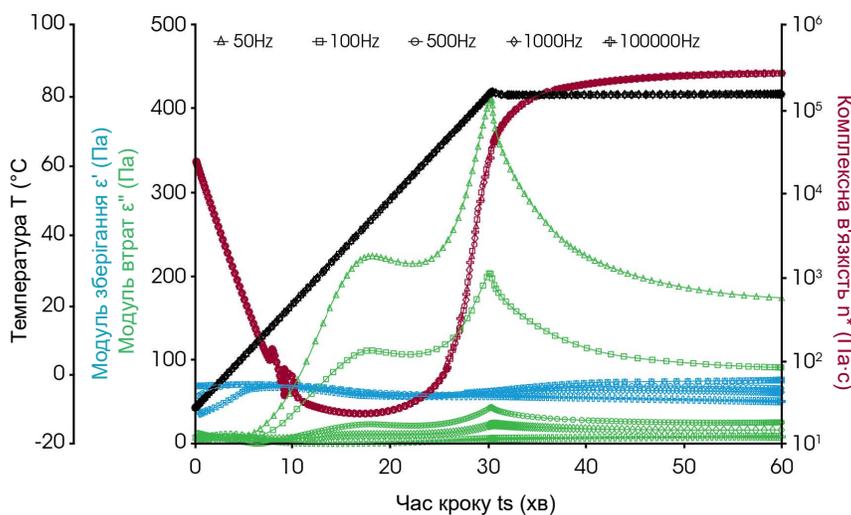


Рисунок 4 (b). Температурне затвердіння - результати діелектричної залежно від в'язкості

Мінімальна в'язкість спостерігається приблизно при 40 °С, при цій температурі коефіцієнт втрат також демонструє пік, що вказує на високу молекулярну рухливість. Вище цієї температури починається затвердіння, як модулі, так і комплексна в'язкість швидко зростають з подальшим підвищенням температури. Тим часом на рухливість молекул впливає як підвищення температури, що призводить до збільшення рухливості, так і збільшення в'язкості, що призводить до зменшення рухливості. Гелеутворення, яке є переходом G'/G'' , відбувається через 28,6 хвилини реакції при температурі 75,6 °С. Після гелеутворення зразок стає твердоподібним (тобто G' більше, ніж G''), а рухливість іонів та диполів стає все більш обмеженою. У міру переходу випробування до ізотермічної стадії коефіцієнт втрат (ϵ'') демонструє негайне різке зниження, оскільки на цій стадії на молекулярну рухливість впливає лише склування матеріалу.

Висновок

Пристрій для випробування діелектричних властивостей (DETA) від TA Instruments для реометрів можна використовувати для одночасних реологічних та діелектричних вимірювань. Його можна використовувати для кількісного контролю затвердіння епоксидної смоли з одним завантаженням зразка та в одному протоколі випробування.

Реометр проводить вимірювання зсуву та повідомляє про механічні властивості, такі як модуль пружності та в'язкість, тоді як вимірювач LCR виконує одночасні діелектричні вимірювання та контролює молекулярну рухливість і розслаблення. Результати забезпечують добру кореляцію зі зв'язком між структурою та властивостями матеріалу.

Посилання

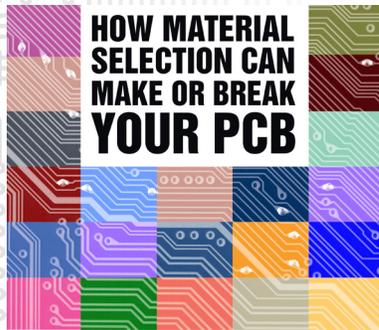
1. W. Jilani, N. Mzabi, O. Gallot-Lavall'ee, N. Fourati, C. Zerrouki, R. Zerrouki and H. Guerhazi, Dielectric relaxations investigation of a synthesized epoxy resin polymer, Eur. Phys. J. Plus 130: 76, (2015)
2. S. Singha and M. J. Thomas, Dielectric Properties of Epoxy Nanocomposites, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 15, No. 1; February (2008)
3. M. J. Kadhim, A. K. Abdullah, I. A. Al-Ajaj, and A. S. Khalil, Dielectric Properties of Epoxy/ Al₂O₃ Nanocomposites, International Journal of Application or Innovation in Engineering & Management (IJAEM), Volume 3, Issue 1, January (2014)
4. Aly Franck, Dielectric Characterization, TA Instruments applications notes APN032

Натисніть [тут](#), щоб завантажити версію цього застосування для друку.

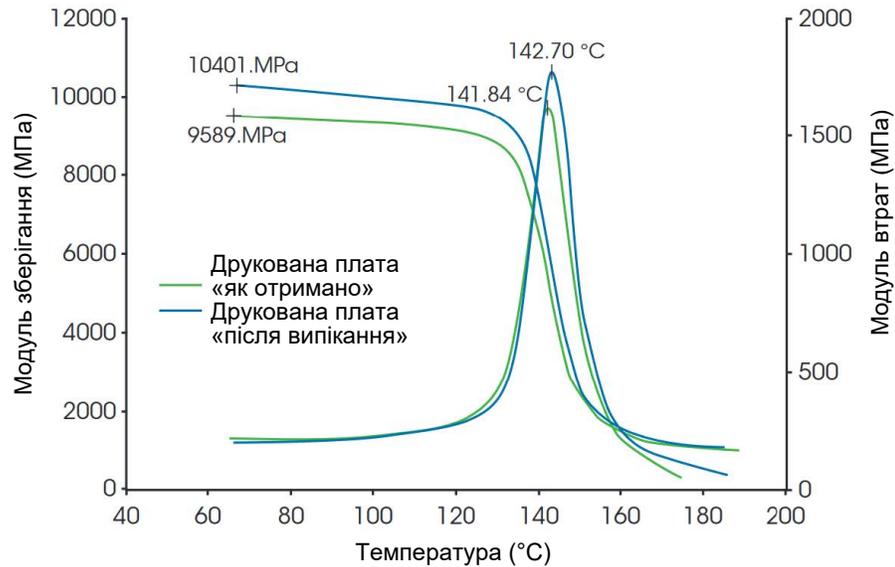
переглянути цю статтю онлайн,  [натисніть тут](#)

 [НАЗАД ДО ЗМІСТУ](#)

Характеристика матеріалів друкованих плат за DMA



TA INSTRUMENTS



Експериментальні умови DMA:
 Тип затискача: Одинарна консоль
 Діапазон температури: від 50 °C до 200 °C
 $\beta = 5^\circ\text{C}/\text{хв}$
 Частота = 1 Гц

DMA вимірює модуль пружності та властивості демпфування (розсіювання енергії) матеріалів, коли вони деформуються під періодичним напруженням або деформацією. Ці вимірювання надають кількісну та якісну інформацію про характеристики матеріалів. DMA особливо корисний для оцінки механічних властивостей в'язкопружних полімерних матеріалів, які проявляють вплив часу, частоти та температури. Матеріали для друкованих плат складаються зі скловолокнистої обплетення, просоченої термореактивною смолою. Характеристика температури склування смоли за допомогою DSC іноді може бути складною через високий вміст волокна. DMA, завдяки своїй чутливості до склування, є ідеальним методом для визначення температури склування (T_g) цих високозаповнених систем. На графіку вище показано два набори кривих для високозаповненого матеріалу друкованої плати. Суцільні лінії кривих представляють дані для матеріалу «як отримано». Пунктирні криві представляють дані для зразка, який пройшов процес «після випікання» або відпал. Зверніть увагу на незначне збільшення T_g та вище значення початкового модуля пружності в результаті додаткового затвердіння. Це чітка демонстрація корисності методу DMA для характеристики ступеня затвердіння та кінцевих механічних властивостей наповнених друкованих плат або термореактивних матеріалів.

Щоб отримати додаткову інформацію або зробити замовлення, перейдіть на веб-сайт <http://www.tainstruments.com/>, щоб знайти інформацію про **ваш місцевий торговий офіс**.

переглянути цю статтю онлайн, натисніть тут

НАЗАД ДО ЗМІСТУ