

Василь Віталійович Володимиров

аспірант

Український державний університет науки і технологій

ННІ «Український державний хіміко-технологічний університет» (Дніпро, Україна)

E-mail: volodymyrov_vasyl@ukr.net, ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-7353-5065>

ОГЛЯД ШЛЯХІВ ПІДВИЩЕННЯ ВІДМОВОСТІЙКОСТІ ЕЛЕКТРОННИХ ПРИБОРІВ ЗА РАХУНОК ВИКОРИСТАННЯ СУЧАСНИХ ПОЛІМЕР-НЕОРГАНІЧНИХ КОМПОЗИТНИХ МАТЕРІАЛІВ З ЕЛЕКТРОННОЮ ПРОВІДНІСТЮ

Останнім часом можна спостерігати постійне зростання потужності обчислювальної техніки, і не в останню чергу це пов'язано з появою багатопроцесорних обчислювальних систем і багатоядерних процесорів. Також підвищенню робочих температур сприяли чіпи SOC (system on chip), у яких практично весь ноутбук побудований у складі одного процесора. Взагалі будь-які компоненти комп'ютера на основі напівпровідників так чи інакше нагріваються під час роботи. Водночас час розвиваються технології, зростає потужність/частота/швидкість, а отже, збільшується і тепловіддача. З огляду на вищевикладене можна зробити висновок, що попри значне поширення безвідмовних флюсів, їх залишки за певних умов, як, наприклад, підвищена температура експлуатації, можуть впливати на безперебійну роботу електронного обладнання.

Ключові слова: підвищені робочі температури; безвідмовні флюси; тепловіддача; ультра тонкий дизайн виробів; ускладнення вентиляції.

Бібл.: 25.

Актуальність теми дослідження. У сучасній електронній промисловості пайка є невід'ємним етапом виробництва, що забезпечує електричне та механічне з'єднання компонентів на друкованих платах. Для забезпечення якісного паяння використовуються флюси, які виконують ряд важливих функцій, таких як видалення оксидів з поверхні матеріалів, що паяються, зниження поверхневого натягу розплавленого припою і полегшення його розтікання.

У сучасному виробництві в переважній більшості випадків безвідмовний флюс входить до складу так званих паяльних паст. Паяльні пасти – це сполучні матеріали, отримані диспергуванням порошку припою у флюсі, який зазвичай також називають транспортним засобом. Паяльні пасти застосовуються на друковану плату шляхом трафаретного друку за допомогою трафарету або на будь-яку металізовану поверхню шляхом дозування через шприц, щоб нанести відповідну невелику кількість пасти на кожну ділянку, яка підлягає паянню, а потім нагріти в печі для розплавлення припою та виконання з'єднання. Ця техніка паяння зазвичай називається паянням оплавленням. У печі оплавлення можна використовувати різні методи нагрівання, включаючи інфрачервоне нагрівання, лазерне нагрівання, нагрівання гарячим повітрям і нагрівання гарячої плити. Паяльні пасти повинні мати певні реологічні властивості, придатні для трафаретного друку або дозування.

Флюс або носій паяльної пасти містить принаймні один активатор, який може видаляти оксидні шари з поверхонь, що з'єднуються, і з порошку припою, щоб забезпечити хороше з'єднання. Крім того, флюс містить компоненти, які регулюють реологічні властивості пасти. Основними компонентами звичайного флюсу є каніфоль і похідні каніфолі, що використовуються в концентрації від 40 до 70 мас.% і комбінація розчинників, що використовуються в концентрації від 20 до 50 мас.% кожного відносно загальної ваги флюсу.

Постановка проблеми. Здійснити огляд проблематики використання сучасних полімер-неорганічних композиційних матеріалів з електронною провідністю, та вплив залишків, після завершення їх використання (завершення циклу пайки) на відмовостійкість електронних пристроїв.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. З розвитком технологій і прагненням до скорочення виробничих витрат і часу, а також екологічних вимог дедалі більшої популярності набувають безвідмивальні флюси (no-clean flux), які являють собою композиційні матеріали. Безвідмивальні флюси були розроблені у 1990-х роках для усунення хлорфторвуглеців (ХФУ) з виробничих майданчиків відповідно до Монреальського протоколу [1; 2]. На відміну від традиційних флюсів, що вимагають обов'язкового відмивання після паяння, безвідмивальні флюси повинні забезпечувати надійне паяне з'єднання, не залишаючи при цьому корозійно активних або електропровідних залишків, які могли б негативно вплинути на працездатність та надійність електронного пристрою.

Однак, незважаючи на свою назву, безвідмивальні флюси все ж таки залишають деяку кількість залишків на платі після процесу паяння. Певні рівні залишків, присутні на друкованих платах після процесу паяння, були описані в літературі, або пов'язані з лабораторними дослідженнями [3] або безпосередньо з виробничим процесом [4]. Ці залишки, кількість та тип яких залежать від багатьох факторів, включаючи характеристики РСВА, тип процесу паяння [4] та середовище паяння (наприклад, азот атмосфера) [5]; можуть містити різні органічні сполуки, які в певних умовах можуть виявляти електропровідність, що призводить до виникнення так званого залишкового опору (residual resistance). Одними з найважливіших факторів, які викликають залишковий опір є хімічний склад флюсу та кількість нанесеного флюсу [4]. Залишковий опір може стати причиною паразитних струмів витоку, зниження ізоляції між провідниками, і, зрештою, виходу з ладу електронного пристрою, особливо в умовах високих робочих температур та вологості.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Одним недоліком таких звичайних флюсів є той факт, що значна кількість каніфолі та інших твердих компонентів флюсу залишається на отриманому паяному з'єднанні або поблизу нього у вигляді залишку флюсу. Під час оплавлення відбувається багато хімічних реакцій між каніфоллю, іншими компонентами флюсу та оксидами металів на поверхнях припою. Нелетка частина продуктів реакції та інертні компоненти сировини залишаються у вигляді залишків на заготовках. Комерційні безвідмивні паяльні пасти мають залишки від 6 до 7% мас. Ці залишки містять різні типи смоли, розчинники та слабкі органічні кислоти (WOA) [5; 7; 8]. Залишки, якщо вони залишаються у значній кількості, призводять до поганого зовнішнього вигляду спаяних ділянок і погіршують контакт контактів спаюваної електронної частини з паяльною пастою. Крім того, залишки флюсу можуть спричинити зниження опору ізоляції між ланцюгами заготовки через поглинання вологи залишками флюсу або можуть призвести до розриву чи роз'єднання ланцюгів через утворення продуктів корозії із залишків флюсу. Це явище корозії може призвести до критичного зменшення поверхні опору ізоляції (SIR) [5; 9; 10] або електрохімічної міграції (ECM) і пов'язаних з нею збоїв короткого замикання. У процесі електрохімічної міграції (ECM) корозія Sn, Ag і Cu відбувається на аноді, а розчинені металеві іони мігрують до катода, де металеві іони можуть осаджуватись і рости назад до аноді у вигляді металевих дендритів. Тому заготовки, призначені для використання в електронному обладнанні, для якого потрібна висока надійність, після пайки оплавленням необхідно промити очисником, щоб видалити залишки флюсу, що залишилися в місцях пайки.

Виклад основного матеріалу. Часто для підвищення надійності електронне обладнання доводиться закривати від вологи. Герметизація виконується шляхом формування всієї заготовки смолою. У такому випадку заготовку необхідно промити засобом для чищення, щоб видалити будь-які залишки флюсу перед нанесенням смоляного покриття або формування.

Класифікація флюсів за стандартом IPC-J-STD-004B наведена в табл. 1 [11].

Таблиця 1 – Класифікація флюсів за стандартом IPC-J-STD-004B

Основа флюсу	Рівень активності флюсу/залишків флюсу	Зміст галогенідів за вагою ¹ , %	Тип флюсу ²	Позначення флюсу
Каніфольна (RO)	Низька (L)	<0,05	L0	ROL0
		<0,5	L1	ROL1
	Середня (M)	<0,05	M0	ROM0
		0,5 – 2,0	M1	ROM1
	Висока (H)	<0,05	H0	ROH0
		>2,0	H1	ROH1
Синтетична (RE)	Низька (L)	<0,05	L0	REL0
		<0,5	L1	REL1
	Середня (M)	<0,05	M0	REM0
		<0,5 – 2,0	M1	REM1
	Висока (H)	<0,05	H0	REH0
		>2,0	H1	REH1
Органічна (OR)	Низька (L)	<0,05	L0	ORL0
		<0,5	L1	ORL1
	Середня (M)	<0,05	M0	ORM0
		<0,5 – 2,0	M1	ORM1
	Висока (H)	<0,05	H0	ORH0
		>2,0	H1	ORH1
Неорганічна (IN)	Низька (L)	<0,05	L0	INL0
		<0,5	L1	INL1
	Середня (M)	<0,05	M0	INM0
		<0,5 – 2,0	M1	INM1
	Висока (H)	<0,05	H0	INH0
		>2,0	H1	INH1

¹ Флюси з вмістом галогенідів менше ніж 0,05 % можуть бути розцінені як такі, що не містять галогенідів. Цей метод описує кількість галогенідів, що міститься у складі флюсу.

² Показник 0 і 1 означає відсутність або присутність галогенідів відповідно.

Для розчинення каніфолі в залишках флюсу успішно використовуються очисники на основі фторованих і хлорованих розчинників. Однак необхідність очищення заготовок перед формуванням смоли вводить додатковий дорогий етап виробництва. Крім того, використання цих розчинників тепер регулюється, оскільки їхні пари спричиняють виснаження озонового шару в атмосфері.

Тому були розроблені паяльні пасти з низьким залишком флюсу, так звані безвідмивні паяльні пасти. У патенті № 5176759 [12], наприклад, розкрито паяльну пасту з мінімізованими залишками флюсу, що залишаються після пайки, яка містить порошкоподібний припій і флюс у домішці. Флюс містить приблизно від 5 % до приблизно 40 % за вагою компонентів носія, які включають каніфоль або похідну каніфолі, активуючий агент і тиксотропний агент, і від приблизно 60 % до приблизно 95 % за вагою розчинника. Розчинник переважно (понад 50 % за масою) містить 2-алкіл-1,3-гександiol, що має від 1 до 4 атомів вуглецю в алкільній групі. В'язкість 2-алкіл-1,3-гександiolу, який використовується в розчиннику, є низькою – зазвичай у діапазоні приблизно 323 сП при 20 °С. У цьому патенті залишок, що залишився, спостерігають візуально та присвоюють один із чотирьох класів від 1 до 4. Відсотки залишкового флюсу не наводяться. Зменшення залишків флюсу, що залишається після пайки опаленням з цим типом паяльної пасти, не викликає суттєвих проблем у звичайному електронному обладнанні, для якого потрібна висока надійність. Однак зменшення залишків паяльної пасти не є цілком задовільним для сучасного електронного обладнання, для якого потрібна надвисока надійність. У патенті № 6887319 В2 [13] описана паяльна паста без залишків, яка не містить каніфолі. Припій без залишків не залишає залишків флюсу після пайки

оплавленням і містить порошок припою, змішаний із пастоподібним флюсом без канифолі. Флюс містить щонайменше один твердий розчинник і щонайменше один високов'язкий розчинник у загальній кількості від 30 до 90 мас. %, на додаток до щонайменше одного рідкого розчинника, причому всі розчинники випаровуються при температурі пайки оплавленням. Флюс може додатково містити від 0,5 до 12 % тиксо-тропного агента, такого як амід жирної кислоти, і від 1 до 15 % активатора, вибраного з органічних кислот та їх солей амінів, причому тиксотропний агент і активатор випаровуються в присутності розчинників, поки розчинники випаровуються. Ця паяльна паста здається задовільною з огляду на кількість залишків, що залишилися після пайки оплавленням, але вона все ще не є задовільною щодо однорідності, стійкості проти розшарування пасти та вимоги до змочування.

Також одним із важливих факторів є температура експлуатації виробу. Тому що залишковий опір безвідмивальних флюсів не є постійною величиною, а змінюється залежно від температури. При підвищенні температури залишковий опір безвідмивальних флюсів переважно зменшується. Це пов'язано з кількома факторами:

1. Іонізація: Підвищення температури сприяє дисоціації молекул органічних залишків флюсу на іони. Збільшення концентрації рухомих іонів призводить до підвищення електропровідності. Це особливо помітно для залишків які містять слабкі органічні кислоти.

2. Збільшення рухливості іонів: Зі зростанням температури збільшується кінетична енергія іонів, що підвищує їхню рухливість. Це також сприяє збільшенню провідності.

3. Термічна деградація компонентів флюсу: При високих температурах компоненти флюсу можуть зазнавати термічної деградації. Деякі продукти цієї деградації можуть бути електропровіднішими, ніж вихідні компоненти. Наприклад, термічне розкладання органічних кислот може призвести до утворення вуглецевих залишків, які мають певну електропровідність.

4. Зміна фазового стану: Деякі залишки флюсу можуть переходити до більш провідного фазового стану при нагріванні (наприклад, з твердого в напіврідкий або рідкий).

Також на залишковий опір може впливати термічна деградація компонентів флюсу. Термічна деградація є одним із ключових факторів, що визначають температурну залежність залишкового опору. При нагріванні сполуки, що входять до складу флюсу, можуть піддаватися різним хімічним перетворенням:

- Декарбоксілювання: органічні кислоти можуть декарбоксілюватись, втрачаючи групу CO_2 , що може призвести до утворення інших продуктів з відмінними властивостями.

- Розкладання смол: смоли та інші полімерні сполуки можуть розпадатися на дрібніші фрагменти, деякі з яких можуть мати провідність.

- Утворення вуглецю: при високій температурі деякі органічні сполуки можуть перетворюватися на вуглець, який є хорошим провідником.

У виробництві електроніки де використовуються безвідмивальні флюси. Для всіх типів процесів паяння передбачається, що кількість залишків, що залишилися, мінімальна і безпечна. Очікується, що використання низького вмісту твердих речовин у безвідмивальному флюсі призводить до майже повного розкладання складових компонентів під час процесу паяння. Однак розкладання флюсу залежить від багатьох факторів, таких як зміна температури на вузлах друкованих плат (PCBA), процесу паяння, кількість і тип флюсу, процедури нанесення флюсу, швидкість нагрівання та температури розкладання хімікатів і т. ін. Тому на практиці PCBA іноді бувають забруднені значною кількістю залишків флюсу [14], включаючи компоненти активатора, переважно слабкі органічні кислоти (WOA). Типові WOA, виявлені в системах безвідмивальних флюсів, є дикарбонові кислоти, такі як адипінова, глутарова, бурштинова та яблучна, які призводять до того, що іонні залишки на поверхні PCBA мають гігроскопічну природу [15]. Поєднання

адсорбованої вологи та іонних забруднюючих речовин, пов'язаних із залишками флюсу, що призводить до утворення електроліту, який може забезпечити середовище для струмів витоку, що призводять до електрохімічної міграції, та, отже, може бути потенційним прискорювачем корозії [16]. Однак кількість та розподіл залишків флюсу значно різняться залежно від конкретного типу процесу паяння та пов'язаних з ним параметрів [17]. Паяння оплавленням припою – це процес, що використовується для друкованих плат з компонентами поверхневого монтажу, а як зазначалось вище, флюс наноситься у вигляді пасти з використанням трафаретного друку, потім слідує монтаж компонентів і потім проходження через паяльну піч. Хоча кількість флюсу, що наноситься в цьому випадку, залежить від площі посадкового місця компонента, під компонентами можуть бути виявлені захоплені залишки, що в кінцевому підсумку може викликати проблеми з корозією при вплив вологих умов [18]. З іншого боку, пайка хвилею припою зазвичай використовує розпилення рідкого флюсу на нижній стороні, якщо використовуються компоненти з об'ємними виводами. Однак частина флюсу також може піднятися на верхню сторону через проливання або через наскрізні отвори. У цьому випадку проводиться пайка в нижній частині РСВА, де температура піднімається до 250 °С, тоді як верхня частина РСВА відчуває лише приблизно 170 °С. Це призводить до диференціалу розкладання флюсу на верхню і нижню сторони [19]. Вибіркова пайка хвилею також використовує рідкі типи флюсів у більшості випадків. Однак процес може бути здійснений різними способами, у тому числі з використанням піддону для маскування небажаних ділянок. Однак, незалежно від процесу, диференціальне нагрівання в зоні пайки й оточення призводить до накопичення залишків флюсу навколо вибірових паяльних ділянок. Відсутність оптимізації кількості розпилення флюсу може призвести до значного рівня залишків у так званих пастках під піддоном [20]. Хоча загальновідомо, що різні процеси пайки можуть призвести до забруднення поверхні друкованої плати, що порушує її чистоту, зараз дослідження відносних рівнів залишків введений різними процесами паяння та його вплив на корозійну надійність ще тривають. Однак вищенаведене розшарування температур більш актуально для силових електронних модулів, де компоненти мають доволі значні габарити та розміщуються з однієї сторони плати а менші габаритні компоненти з іншої.

Також одним зі значних факторів відмови обладнання є прискорена корозія у вологих умовах за рахунок внутрішнього забруднення на вузлах друкованих плат при використанні безвідмивальних флюсів під час паяння. Найбільш важливими факторами в цьому випадку є хімія флюсу та його характеристики розкладання під час процесу паяння, що призводить до утворення залишків. Найчастіше використовувані системи флюсу містять: розчинник – середовище для змішування всіх компонентів флюсу, часто суміш спиртів, активатори – здебільшого слабкі органічні кислоти або галогеніди (рідше зустрічаються у безвідмивальних флюсах), і носій – нелетуча сполука, така як смола або ефір, яка стабільна в діапазоні температур, використовуваних у процесі паяння [21]. Припущення, що лежить в основі технології безвідмивальних флюсів (no-clean), полягає в тому, що агресивні хімікати, що використовуються в розчині флюсу, згоряють, тобто випаровуються або розкладаються на леткі речовини під час процесу паяння, і залишають лише мінімальний рівень залишків агресивної природи на поверхні друкованої плати. Однак на практиці, як уже зазначалось раніше, це відбувається рідко, і друковані плати можуть бути забруднені значною кількістю залишків флюсу, що складаються з іонних сполук, які використовуються як активатори в первинній або розкладеній формі. Вони можуть взаємодіяти з вологістю через свою гігроскопічну природу, роблячи адсорбований водний шар хорошим електролітом для провідності струму та подальшої корозії [22]. Тому в літературі повідомлялося про низку збоїв друкованих плат через наявності цих

залишків флюсу, які зазвичай викликають зниження опору поверхневої ізоляції (SIR), що призводить до збільшення струму витoku або за певних умов, електрохімічної міграції та утворення дендритів [23; 24]. Кількість, розподіл та морфологія залишків флюсу значно різняться залежно від конкретного процесу паяння та пов'язаних з ним параметрів. Результати показують, що зміна умов процесу, таких як температура поверхні друкованої плати під час паяння, має велике значення і може призвести до значної зміни кількості локалізованих залишків [25].

Висновки. Таким чином, можна зробити висновок, що попри значну поширеність безвідмивальних флюсів, їхні залишки за певних умов можуть впливати на безвідмовну роботу електронної техніки для складання (формування паяльних з'єднань) якої вони були використані. Тож, є ще певний простір для досліджень, пов'язаний з умовами експлуатації електронних виробів, як-то підвищена вібрація (характерна для модулів керування рухомою технікою), підвищена вологість та, що останнім часом стає дедалі актуальним, підвищені температури експлуатації виробів, які зумовлені зростаючою обчислювальною потужністю, ультратонким дизайном, та пов'язаною з цим складністю штучної вентиляції.

Список використаних джерел

1. Ramirez, C., & Lei, K.-S. (1996). Evaluation of the reliability and corrosivity of voc-free, no-clean fluxes using standard, modified and electrochemical methods. *Soldering & Surface Mount Technology*, 8(1), 6–9. <https://doi.org/10.1108/09540919610777555>.
2. Adams, K. M., Anderson, J. E., & Graves, Y. B. (1994). Ionograph sensitivity to chemical residues from 'no clean soldering fluxes: comparison of solvent extract conductivity and surface conductivity. *Circuit World*, 20, 41–44. <https://doi.org/10.1108/eb046251>.
3. Conseil, H., Verdingovas, V., Jellesen, M. S., & Ambat, R. (2015). Decomposition of no-clean solder flux systems and their effects on the corrosion reliability of electronics. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 27(1), 23–32. <https://doi.org/10.1007/s10854-015-3712-x>.
4. Conseil, H., Stendahl Jellesen, M., & Ambat, R. (2014). Contamination profile on typical printed circuit board assemblies vs soldering process. *Soldering & Surface Mount Technology*, 26(4), 194–202. <https://doi.org/10.1108/ssmt-03-2014-0007>.
5. Verdingovas, V., Jellesen, M. S., & Ambat, R. (2015). Solder Flux Residues and Humidity-Related Failures in Electronics: Relative Effects of Weak Organic Acids Used in No-Clean Flux Systems. *Journal of Electronic Materials*, 44(4), 1116–1127. <https://doi.org/10.1007/s11664-014-3609-0>.
6. Piotrowska, K., Jellesen, M. S., & Ambat, R. (2017). Thermal decomposition of solder flux activators under simulated wave soldering conditions. *Soldering & Surface Mount Technology*, 29(3), 133–143. <https://doi.org/10.1108/ssmt-01-2017-0003>.
7. Smith, B. A., & Turbini, L. J. (1999). Characterizing the weak organic acids used in low solids fluxes. *Journal of Electronic Materials*, 28(11), 1299–1306. <https://doi.org/10.1007/s11664-999-0171-2>.
8. Zhan, S., Azarian, M. H., & Pecht, M. (2008). Reliability of printed circuit boards processed using no-clean flux technology in temperature–humidity–bias conditions. *IEEE Transactions on Device and Materials Reliability*, 8(2), 426–434. <https://doi.org/10.1109/tdmr.2008.922908>.
9. Piotrowska, K., Ud Din, R., Grumsen, F. B., Jellesen, M. S., & Ambat, R. (2018). Parametric study of solder flux hygroscopicity: Impact of weak organic acids on water layer formation and corrosion of electronics. *Journal of Electronic Materials*, 47(7), 4190–4207. <https://doi.org/10.1007/s11664-018-6311-9>.
10. Hunt, C., Zou, L. (1999). The impact of temperature and humidity conditions on surface insulation resistance (SIR) values for various fluxes. *Journal of Soldering and Surface Mount Technology*, 11(1), 36–43. <http://eprintspublications.npl.co.uk/id/eprint/1067>.
11. Requirements for Soldering Fluxes. [A standard developed by the Flux Specifications Task Group (5-24a) of the Assembly and Joining Processes Committee (5-20) of IPC]. (2011). *IPC J-STD-004B with Amendment 1*. <https://www.ipc.org/TOC/J-STD-004BwAm1.pdf>.
12. High temperature solder pastes [US3915729A](https://patents.google.com/patent/US3915729A/en?q=(no-clean+flux)&oq=no-clean+flux) 1974-04-09 1975-10-28 Du Pon. [https://patents.google.com/patent/US3915729A/en?q=\(no-clean+flux\)&oq=no-clean+flux](https://patents.google.com/patent/US3915729A/en?q=(no-clean+flux)&oq=no-clean+flux).

13. US4298407A1980-08-041981-11-03E. I. Du Pont De Nemours And Company Flux treated solder powder composition [https://patents.google.com/patent/US4298407A/en?q=\(no-clean+flux\)&oq=no-clean+flux](https://patents.google.com/patent/US4298407A/en?q=(no-clean+flux)&oq=no-clean+flux).
14. Biocca, P. (2001). Flux Chemistries and Thermal Profiling: Avoiding Soldering Defects in SMT Assembly, Loctite/Multicore Solders, Richardson, TX.
15. Song, B., Azarian, M. H., & Pecht, M. G. (2013). Effect of temperature and relative humidity on the impedance degradation of dust-contaminated electronics. *Journal of the Electrochemical Society*, 160(3), C97—C105. <https://doi.org/10.1149/2.024303jes>.
16. Verdingovas, V., Jellesen, M. S., Rizzo, R., Conseil, H., & Ambat, R. (2013). Impact of hygroscopicity and composition of solder flux residue on the reliability of PCBA under corrosive conditions. In *Proceedings of EUROCORR*. 2013. <http://www.eurocorr2013.org>.
17. Hansen, K. S., Jellesen, M. S., Møller, P., Westermann, P. J. S., & Ambat, R. (2009). Effect of solder flux residues on corrosion of electronics. In *Annual Reliability and Maintainability Symposium, 2009. RAMS 2009*. IEEE Press. <https://doi.org/10.1109/RAMS.2009.4914727>.
18. Jellesen, M. S., Dutta, M., Verdingovas, V., & Ambat, R. (2012). Detection of acid release from reflow solder flux residues using localized test methods, paper presented at Eurocorr 2012, Istanbul, 9-13 September.
19. Conseil, H., Jellesen, M. S., Verdingovas, V., & Ambat, R. (2013). Decomposition studies of no-clean solder flux systems in connection with corrosion reliability of electronics. In *EUROCORR 2013 - European Corrosion Congress*. Article Paper H European Federation of Corrosion.
20. Munson, T. (2003). Understanding selective pallet soldering residue. *Circuit Assembly*, 14(9), 48. https://static1.squarespace.com/static/5ddd523267a1ae54e9d2cb96/t/5eed2530a6da31edac68c91/1592709715629/2003.09-Understanding_Selective_Pallet_Soldering_Residue_-_Circuits_Assembly.pdf.
21. Minges, M.L. (1989). *Electronic Materials Handbook*, 11, 1st edn. (ASM International, Almere).
22. Rathinavelu, U., Jellesen, M.S., Møller, P., Ambat, R. (2012). *IEEE Trans. Compon. Package Technol.*, 2(4), 719–728.
23. Verdingovas, V., Jellesen, M. S., Ambat, R. (2013). *Corros. Eng. Sci. Technol.*, 48(6), 426–435.
24. Verdingovas, V., Jellesen, M. S., & Ambat, R. (2015). Relative effect of solder flux chemistry on the humidity related failures in electronics. *Soldering & Surface Mount Technology*, 27(4), 146–156. <https://doi.org/10.1108/ssmt-11-2014-0022>.
25. Conseil, H., Jellesen, M.S., Ambat, R. (2014). *Solder. Surf. Mt. Technol.*, 26(4), 194–202.

References

1. Ramirez, C., & Lei, K.-S. (1996). Evaluation of the reliability and corrosivity of voc-free, no-clean fluxes using standard, modified and electrochemical methods. *Soldering & Surface Mount Technology*, 8(1), 6–9. <https://doi.org/10.1108/09540919610777555>.
2. Adams, K. M., Anderson, J. E., & Graves, Y. B. (1994). Ionograph sensitivity to chemical residues from 'no clean soldering fluxes: comparison of solvent extract conductivity and surface conductivity. *Circuit World*, 20, 41–44. <https://doi.org/10.1108/eb046251>.
3. Conseil, H., Verdingovas, V., Jellesen, M. S., & Ambat, R. (2015). Decomposition of no-clean solder flux systems and their effects on the corrosion reliability of electronics. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 27(1), 23–32. <https://doi.org/10.1007/s10854-015-3712-x>.
4. Conseil, H., Stendahl Jellesen, M., & Ambat, R. (2014). Contamination profile on typical printed circuit board assemblies vs soldering process. *Soldering & Surface Mount Technology*, 26(4), 194–202. <https://doi.org/10.1108/ssmt-03-2014-0007>.
5. Verdingovas, V., Jellesen, M. S., & Ambat, R. (2015). Solder Flux Residues and Humidity-Related Failures in Electronics: Relative Effects of Weak Organic Acids Used in No-Clean Flux Systems. *Journal of Electronic Materials*, 44(4), 1116–1127. <https://doi.org/10.1007/s11664-014-3609-0>.
6. Piotrowska, K., Jellesen, M. S., & Ambat, R. (2017). Thermal decomposition of solder flux activators under simulated wave soldering conditions. *Soldering & Surface Mount Technology*, 29(3), 133–143. <https://doi.org/10.1108/ssmt-01-2017-0003>.
7. Smith, B. A., & Turbini, L. J. (1999). Characterizing the weak organic acids used in low solids fluxes. *Journal of Electronic Materials*, 28(11), 1299–1306. <https://doi.org/10.1007/s11664-999-0171-2>.

8. Zhan, S., Azarian, M. H., & Pecht, M. (2008). Reliability of printed circuit boards processed using no-clean flux technology in temperature–humidity–bias conditions. *IEEE Transactions on Device and Materials Reliability*, 8(2), 426–434. <https://doi.org/10.1109/tdmr.2008.922908>.
9. Piotrowska, K., Ud Din, R., Grumsen, F. B., Jellesen, M. S., & Ambat, R. (2018). Parametric study of solder flux hygroscopicity: Impact of weak organic acids on water layer formation and corrosion of electronics. *Journal of Electronic Materials*, 47(7), 4190–4207. <https://doi.org/10.1007/s11664-018-6311-9>.
10. Hunt, C., Zou, L. (1999). The impact of temperature and humidity conditions on surface insulation resistance (SIR) values for various fluxes. *Journal of Soldering and Surface Mount Technology*, 11(1), 36–43. <http://eprintspublications.npl.co.uk/id/eprint/1067>.
11. Requirements for Soldering Fluxes. [A standard developed by the Flux Specifications Task Group (5-24a) of the Assembly and Joining Processes Committee (5-20) of IPC]. (2011). *IPC J-STD-004B with Amendment 1*. <https://www.ipc.org/TOC/J-STD-004BwAm1.pdf>.
12. High temperature solder pastes [US3915729A](https://patents.google.com/patent/US3915729A/en?q=(no-clean+flux)&oq=no-clean+flux) 1974-04-09 1975-10-28 Du Pont. [https://patents.google.com/patent/US3915729A/en?q=\(no-clean+flux\)&oq=no-clean+flux](https://patents.google.com/patent/US3915729A/en?q=(no-clean+flux)&oq=no-clean+flux).
13. US4298407A 1980-08-04 1981-11-03 E. I. Du Pont De Nemours And Company Flux treated solder powder composition [https://patents.google.com/patent/US4298407A/en?q=\(no-clean+flux\)&oq=no-clean+flux](https://patents.google.com/patent/US4298407A/en?q=(no-clean+flux)&oq=no-clean+flux).
14. Biocca, P. (2001). Flux Chemistries and Thermal Profiling: Avoiding Soldering Defects in SMT Assembly, Loctite/Multicore Solders, Richardson, TX.
15. Song, B., Azarian, M. H., & Pecht, M. G. (2013). Effect of temperature and relative humidity on the impedance degradation of dust-contaminated electronics. *Journal of the Electrochemical Society*, 160(3), C97–C105. <https://doi.org/10.1149/2.024303jes>.
16. Verdingovas, V., Jellesen, M. S., Rizzo, R., Conseil, H., & Ambat, R. (2013). Impact of hygroscopicity and composition of solder flux residue on the reliability of PCBA under corrosive conditions. In *Proceedings of EUROCORR*. 2013. <http://www.eurocorr2013.org>.
17. Hansen, K. S., Jellesen, M. S., Møller, P., Westermann, P. J. S., & Ambat, R. (2009). Effect of solder flux residues on corrosion of electronics. In *Annual Reliability and Maintainability Symposium, 2009. RAMS 2009*. IEEE Press. <https://doi.org/10.1109/RAMS.2009.4914727>.
18. Jellesen, M. S., Dutta, M., Verdingovas, V., & Ambat, R. (2012). Detection of acid release from reflow solder flux residues using localized test methods, paper presented at Eurocorr 2012, Istanbul, 9-13 September.
19. Conseil, H., Jellesen, M. S., Verdingovas, V., & Ambat, R. (2013). Decomposition studies of no-clean solder flux systems in connection with corrosion reliability of electronics. In *EUROCORR 2013 - European Corrosion Congress*. Article Paper H European Federation of Corrosion.
20. Munson, T. (2003). Understanding selective pallet soldering residue. *Circuit Assembly*, 14(9), 48. https://static1.squarespace.com/static/5ddd523267a1ae54e9d2cb96/t/5eed2530a6da31edac68c91/1592709715629/2003.09-Understanding_Selective_Pallet_Soldering_Residue_-_Circuits_Assembly.pdf.
21. Minges, M. L. (1989). *Electronic Materials Handbook*, 11, 1st edn. (ASM International, Almere).
22. Rathinavelu, U., Jellesen, M. S., Møller, P., Ambat, R. (2012). *IEEE Trans. Compon. Package Technol.*, 2(4), 719–728.
23. Verdingovas, V., Jellesen, M. S., Ambat, R. (2013). *Corros. Eng. Sci. Technol.*, 48(6), 426–435.
24. Verdingovas, V., Jellesen, M. S., & Ambat, R. (2015). Relative effect of solder flux chemistry on the humidity related failures in electronics. *Soldering & Surface Mount Technology*, 27(4), 146–156. <https://doi.org/10.1108/ssmt-11-2014-0022>.
25. Conseil, H., Jellesen, M. S., Ambat, R. (2014). *Solder. Surf. Mt. Technol.*, 26(4), 194–202.

Отримано 13.05.2025

Vasyl Volodymyrov

PhD Student, Department of Technologies of Natural and Synthetic Polymers, Fats and Food Products,
Ukrainian State University of Science and Technology,

National Research Institute "Ukrainian State University of Chemical Technology" (Dnipro, Ukraine)

E-mail: volodymyrov_vasyl@ukr.net. ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-7353-5065>

**INCREASING THE FAULT TOLERANCE OF ELECTRONIC DEVICES
USING MODERN POLYMER-INORGANIC COMPOSITE MATERIALS
WITH ELECTRONIC CONDUCTIVITY**

Recently, we can observe steady increase in the power of computing equipment, not least of which is due to emergence of multiprocessor computing systems and multicore processors, when several cores of one processor can be implemented in the conditions of one microcircuit. Not least of all, SOC (system on chip) chips have contributed to the increase in operating temperatures, in which almost the entire laptop is built as part of one processor. In general, any computer components based on semiconductors heat up in one way or another during operation. At the same time, technologies are developing, power/frequency/speed are increasing, and therefore heat dissipation is also increasing.

In addition, more and more manufacturers prefer ultra-thin product designs, we can see ultra-thin TVs, laptops, tablet computers, etc. much more often. All this, while packing more and more power into a smaller volume of products, leads to the increase in thermal load and difficulty in ventilation. Artificial ventilation and cooling are no longer able to reduce temperatures to the level that was 5-10 years ago.

The problem of studying failures of electronic equipment is global in nature, not least these failures are caused by a change in the resistance of solder flux residues, which, under the influence of a number of factors, can change their parameters. Unfortunately, in Ukraine, due to the decline in the production of electronic equipment, this issue has not been raised recently, but in the world space this problem remains relevant and may reach a new level, since in recent times production of electronic equipment has been rapidly developing. One example is the factor of the rapid increase in laptop sales, which is due to the Coronavirus pandemic, which provoked a sharp demand for mobile PCs. If in pre-pandemic 2019 the average age of a home laptop was 6 years, then the mass transition to remote work required their renewal.

Based on the above, we can conclude that despite wide distribution of no-wash fluxes, their residues, under certain conditions, can to some extent affect the trouble-free operation of electronic equipment for the assembly (formation of solder joints) of which they were used. Therefore, there is still some room for research related to operating conditions of electronic products, including increased vibration (typical of control modules of mobile equipment), increased humidity and, which has recently become increasingly relevant, increased operating temperatures of products, which are due to growing computing power, ultra-thin design, and the associated complexity of artificial ventilation.

Keywords: increased operating temperatures; no-clean fluxes; heat transfer; ultra-thin product design; ventilation complications.

Table: 1. References: 25.